

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA VOGT

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UMA ENCOSTA
COLUVIONAR NO OLEODUTO ARAUCÁRIA-PARANAGUÁ (OLAPA)**

CURITIBA
2012

VANESSA VOGT

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UMA ENCOSTA
COLUVIONAR NO OLEODUTO ARAUCÁRIA-PARANAGUÁ (OLAPA)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Andrea Sell Dyminski

Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro C. M. Kormann

CURITIBA
2012

TERMO DE APROVAÇÃO

VANESSA VOGT

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE UMA ENCOSTA COLUVIONAR NO OLEDUTO ARAUCÁRIA-PARANAGUÁ (OLAPA)

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Geotecnia, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:


Prof.ª Dr.ª Andrea Sell Dyminski

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR

Co-orientador:


Prof. Dr. Alessandro Christopher Morales Kormann

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR

Examinadores:


Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil -
UFPR


Prof. Dr. Luiz Antonio Bressani

Departamento de Engenharia Civil - UFRGS

Curitiba, 31 de maio de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Paraná pela confiança em fazer parte desse grupo, amizade, apoio incondicional e pela transmissão dos conhecimentos.

À minha professora orientadora Andréa Sell Dyminski, pela amizade e apoio as minhas mudanças profissionais e crescimento pessoal. Admiro sua dedicação e alegria contagiante.

Ao professor Alessandro Christopher Morales Kormann, pelas suas palavras sábias nos momentos mais importantes na elaboração dessa dissertação.

A equipe do Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada (LPGA) da Universidade Federal do Paraná por me ensinar o ensaio de geofísica de eletrorresistividade a cada campanha de investigação. Além da paciência em responder as minhas milhares de perguntas durante e depois de cada ensaio, só quem conviveu comigo que sabe.

Ao Adão Nerceu de Oliveira e sua equipe, pela sua amizade, compreensão e pela força em campo ao realizar as coletas das amostras.

À equipe do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento (LACTEC), pela orientação na execução e interpretação dos ensaios de caracterização e ao funcionário José Maurilio Silva pela ajuda nas interpretações do ensaio de resistividade em laboratório.

À equipe da Petrobras pelos inúmeros apoios, desde integrações, acesso a área, desligamento da proteção catódica do duto e principalmente pela cessão dos dados utilizados nesta dissertação.

Aos meus pais, Delenir Vogt e Luiz Ernesto Vogt, pelo incentivo, dedicação, apoio, carinho e por entenderem meus altos e baixos nessa etapa da minha vida.

Aos amigos de longa data por tentar entender que em muitos momentos tive que me afastar de suas companhias, tão apreciada por mim, para me dedicar à pesquisa.

Aos novos amigos que fiz durante o período do mestrado, em especial aos amigos da “sala 28”, que me aguentaram em momentos de tensão, de tristeza, de alegria, de insegurança, de sonho, de felicidade e esquecimentos.

A todos aqueles que dedicaram seu tempo a conversar, discutir e dar opiniões sobre os temas abordados neste trabalho, meu muito obrigada.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.
(Albert Einstein)

RESUMO

Encostas coluvionares são comuns ao longo de toda a costa brasileira. Os solos dessas regiões apresentam estratigrafia bastante heterogênea e complexa, além de suscetíveis a movimentos de massa de diversos tipos. Dados discretos sobre solos coluvionares são comumente usados na avaliação de estabilidade de taludes. Nível d'água, estratigrafia, resistência e permeabilidade são normalmente obtidos através de furos de sondagens. Porém, em solos de grande heterogeneidade, como os coluvionares, essas informações trazem embutida uma gama de incertezas. Em geral, os dados obtidos através de investigações de campo e laboratório convencionais permitem avaliar os parâmetros do solo em determinadas porções do maciço. Ou seja, obtêm-se informações em pontos específicos ou planos do sítio (avaliação discreta), que deverão ser ampliadas para o meio contínuo que compõe o subsolo. Neste trabalho, o método geofísico de eletrorresistividade foi utilizado com a finalidade de aprimorar o conhecimento sobre a estratigrafia de uma importante encosta coluvionar e situada na região de Serra do Mar do Paraná. Com base nos dados da geofísica foram determinados os pontos de coleta de amostra, deformadas e indeformadas, optando-se por pontos contrastantes de eletrorresistividade. Foram realizados ensaios de caracterização física do material além da sua resistência mecânica por cisalhamento direto. As características dos solos, juntamente com a melhor descrição do subsolo com os caminhamentos geofísicos permitiu um melhor conhecimento da variabilidade do solo da encosta, observando-se assim descontinuidades eletrorresistivas e zonas preferenciais de fluxo que contribuem para o fenômeno de rastejo na região.

Palavra-chave: Solo Coluvionar, Estabilidade, Resistividade, Geofísica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Formação do solo coluvionar.....	17
Figura 2 - Equilíbrio entre tensões atuantes e resistentes em um talude.....	19
Figura 3 - Superfície crítica de ruptura.....	20
Figura 4 - Amostrador de parede grossa do ensaio SPT.....	23
Figura 5 - Ensaio SPT.....	24
Figura 6 - Onde sísmicas geradas artificialmente.....	29
Figura 7 - Esquema do geofone e geofones utilizados para levantamentos rasos.....	30
Figura 8 - Representação equipamento de exploração sísmica.....	30
Figura 9 - Esquema do ensaio sísmico de reflexão.....	31
Figura 10 - Esquema do ensaio sísmico de refração.....	31
Figura 11 - Esquema de funcionamento do método GPR.....	33
Figura 12 - Esquema de funcionamento do ensaio elétrico de resistividade.....	35
Figura 13 - Resistividade elétrica para diferentes materiais.....	36
Figura 14 - Configuração de Wenner.....	37
Figura 15 - Configuração de Schlumberger.....	38
Figura 16 - Configuração dipolo-dipolo.....	38
Figura 17 - Seções de contribuição do sinal para diferentes configurações.....	39
Figura 18 - Procedimento do caminhamento elétrico através do arranjo dipolo-dipolo.....	41
Figura 19 - Representação da pseudo-seção nas medidas de caminhamento elétrico.....	42
Figura 20 - Fotografia da área residencial de Vagnhäräd após o deslizamento.....	50
Figura 21 - Mapa detalhado da região estudada.....	50
Figura 22 - Perfis de geofísica por eletrorresistividade.....	51
Figura 23 - Perfis de geofísica por eletrorresistividade.....	52
Figura 24 - Caixa padrão para medição de resistividade de solos em laboratório.....	53
Figura 25 - Vista aérea da encosta OLAPA.....	58
Figura 26 - Vista aérea do local do acidente indicado pela linha tracejada.....	60
Figura 27 - Vista geral da encosta.....	61
Figura 28 - Ruptura do duto.....	61
Figura 29 - Movimentação do Inclinômetro I-06, próximo ao local rompido.....	62
Figura 30 - Planta topográfica da encosta OLAPA – instrumentação.....	63
Figura 31 - Modelo geotécnico do rastejo com falhas gravitacionais.....	64
Figura 32 - Falha gravitacional no topo do talude.....	65
Figura 33 - Mapa de Localização dos ensaios geofísicos.....	68
Figura 34 - Equipamento utilizado nos ensaios de tomografia elétrica 2D.....	69
Figura 35 - Procedimento do levantamento geofísica de eletrorresistividade.....	70
Figura 36 - Seção transversal da encosta OLAPA (falta legenda dos solos).....	71

Figura 37 - Pontos de amostragem.....	72
Figura 38 - Locais das coletas com os caminhamentos da geofísica (OLAPA).....	73
Figura 39 - Procedimento para coleta de amostras indeformadas.	75
Figura 40 - Coleta das amostras indeformadas.....	77
Figura 41 - Montagem da caixa de cisalhamento.....	80
Figura 42 - Curva recalque x raiz quadrada do tempo.....	81
Figura 43 - Ensaios de retenção de água.	84
Figura 44 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade.	86
Figura 45 - Coeficiente angular para determinação da resistividade.	87
Figura 46 - (a) Gráfico da resistividade <i>versus</i> umidade, (b) zoom no final do gráfico.	88
Figura 47 - Gráfico da resistividade <i>versus</i> umidade em escala log.	88
Figura 48 - Modelo da resistividade real da Linha 1 com a sondagem SPT.	91
Figura 49 - Modelo da resistividade real da Linha 2 com a sondagem SPT.	92
Figura 50 - Modelo da resistividade real da Linha 3 com a sondagem SPT.	93
Figura 51 - Modelo da resistividade real da Linha 4 com a sondagem SPT.	94
Figura 52 - Modelo da resistividade real da Linha 5 com a sondagem SPT.	95
Figura 53 - Curva Granulométrica.....	99
Figura 54 - Tensão cisalhante crescente com o deslocamento horizontal – Amostra A2.	100
Figura 55 - Ruptura plástica - Amostra A4.	100
Figura 56 – Corpo de prova de 13,3 kPa apresentou comportamento de dilatação – Amostra A4.	101
Figura 57 - Tensão Cisalhante <i>versus</i> Deslocamento horizontal - Amostra A1.	101
Figura 58 - Tensão cisalhante <i>versus</i> Tensão Normal da Amostra A1.....	102
Figura 59 - Envoltórias de resistência obtidas dos ensaios de cisalhamento direto.	103
Figura 60 - Ensaio de retenção de umidade em solos.....	105
Figura 61 - Comparativo do ensaio de retenção de umidade com a umidade natural.	105
Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistividade.	106
Figura 63 - Resultados dos ensaios de resistividade em logaritmo.....	107
Figura 64 - Ensaio de resistividade em solos.....	108
Figura 65 - Resistividade mínima de laboratório.....	109
Figura 66 - Determinação da resistividade nos ensaios.....	110
Figura 67 - Comparativo de resistividades. – Laboratório x Superficial da Geofísica.....	111
Figura 68 – Queda Ôhmica do ensaio de geofísica n=1 para os locais de coleta das amostras.....	116
Figura 69 – Comparativo de resistividades. – Laboratório x nível 1 da Geofísica.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos geofísicos	27
Tabela 2 - Métodos geofísicos e suas principais aplicações.....	28
Tabela 3 - Síntese dos principais métodos geofísicos utilizados na investigação de deslizamentos.....	46
Tabela 4 - Dados de ensaio de resistividade para teores de umidade constante.	56
Tabela 5 - Resumo dos dados de sondagem da encosta OLAPA.....	66
Tabela 6 - Registro das amostras	76
Tabela 7 - Deslocamento típicos para a mobilização da resistência de pico em caixa de cisalhamento.	82
Tabela 8 - Caracterização da condição natural da amostra.....	96
Tabela 9 - Massa específica, limites de Atterberg e índices dos solos.	97
Tabela 10 - Análise Granulométrica.	98
Tabela 11 - Classificação Granulométrica.....	98
Tabela 12 - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.	103
Tabela 13 - Comparativo do ensaio de cisalhamento.....	104
Tabela 14 - Análise estatística dos ensaios de cisalhamento.	104
Tabela 15 - Resistividade do solo - Resistividade em Laboratório x Geofísica.	111
Tabela 16 - Resultados da geofísica para n=1 próximo da coleta de amostras.	115

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIT	- Área de Interesse Turístico
APA	- Área de Proteção Ambiental
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CE	- Caminhamento Elétrico
CTP	- <i>City Tunnel Project</i>
DHP's	- Drenos Horizontais profundos
IAP	- Instituto Ambiental do Paraná
IC	- Índice de Consistência ()
IRTP	- <i>International Reference Test Procedure</i>
ISSMFE	- <i>International Society for Soil Mechanics and Foundation</i>
LAGEMA	- Laboratório de Análises Geotécnicas e Meio Ambiente
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
OLAPA	- Oleduto Araucária-Paranaguá
REPAR	- Refinaria Presidente Getúlio Vargas
RI	- Queda Ôhmica
SEV	- Sondagem Elétrica Vertical
SPT	- <i>Standard Penetration Test</i>
SUCS	- Sistema de Classificação Unificada dos Solos

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- Espaçamento entre os eletrodos de corrente e os eletrodos potenciais
A	- Área da seção transversal por onde flui a corrente
c	- Coesão estimada por Mohr-Colomb
C	- Eletrodos de corrente
\mathbf{d}	- Vetor de perturbação do modelo
F	- Fator de segurança
\mathbf{F}	- Matriz de suavização
\mathbf{g}	- Vetor de discrepância
I	- Corrente elétrica
\mathbf{J}	- Atriz Jacobiana das derivadas parciais
L	- Espaçamento dos eletrodos de corrente
L	- Comprimento do caminho elétrico
P	- Eletrodos potenciais
R	- Resistência elétrica
R_s	- Resistência do solo
\mathbf{R}	- Vetor do logaritmo dos valores de resistividade modelada
rms	- Erro médio quadrático
\mathbf{u}	- Fator de suavização
V	- Potencial resultante
ϕ	- Ângulo de atrito do solo
τ	- Tensão cisalhante requerida para o equilíbrio
γ_{nat}	- Peso específico
\mathbf{e}_{nat}	- Índice de vazios natural
K_{20}	- Coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20°C
γ_g	- Massa específica dos grãos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
1.2.1. Ambiental	14
1.2.2. Social	14
1.2.3. Econômica	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. INSTABILIDADE EM TALUDES COLUVIONARES	16
2.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	19
2.3. SONDAGEM SPT	23
2.4. SONDAGEM GEOFÍSICA	25
2.4.1. Geofísica pelo método sísmico	29
2.4.2. Geofísica por radar de penetração no solo (GPR)	33
2.4.3. Geofísica de eletrorresistividade	35
2.4.4. Investigação geofísica em encostas	45
2.5. ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO	53
3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ENCOSTA ESTUDADA	58
3.1. HISTÓRICO DE MOVIMENTAÇÕES	59
3.2. CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO - SONDAGENS	64
4. MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1. GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE	67
4.2. COLETA DE AMOSTRAS	71
4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	78
4.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	78
4.5. ENSAIO DE RETENÇÃO DE UMIDADE	82
4.6. ENSAIO DE RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO	84
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1. GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE	89
5.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	96
5.3. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	100
5.4. ENSAIOS DE RETENÇÃO DE UMIDADE	105
5.5. ENSAIO DE RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO	106
5.6. COMPARATIVO DAS RESISTIVIDADES I	110
5.7. COMPARATIVO DAS RESISTIVIDADES II	115
6. CONCLUSÕES	117
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS	120
ANEXO I - QUADRO RESUMO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	125
ANEXO II - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	127

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a fim de se diminuïrem os preços no transporte de gás natural e combustíveis derivados do petróleo, houve a necessidade de se encontrar um método mais econômico e rápido do que o rodoviário. Para tanto, surgiu à necessidade do transporte dutoviário. Atualmente, o país possui em torno de 14.000 km de oleodutos parte dos quais atravessa regiões da Serra do Mar, regiões com aclives e declives acentuados e áreas instáveis do ponto de vista geotécnico. Nessas áreas os dutos estão sujeitos a esforços adicionais impostos pelo terreno, podendo colocar em risco a integridade do duto.

É importante conhecer a dinâmica destes sítios, que muitas vezes são formados por terrenos bastante heterogêneos e de comportamento geotécnico complexo. Assim, propôs-se o estudo de uma área específica da Serra do Mar paranaense, visando compreender melhor os processos de movimentos que ocorrem na região.

A área em estudo é caracterizada por um solo coluvionar, que em sua história apresentou movimentação em 1999, sendo observada a presença de trincas superficiais no terreno. Por ela passa o oleoduto Araucária - Paranaguá (OLAPA), que se encontra instalado parte em solo coluvionar estável e parte na região onde existe processo de rastejo lento. Em fevereiro de 2001, este sítio apresentou significativas movimentações de massa oblíqua ao eixo do duto que por sua vez provocou esforços na estrutura, levando à ruptura (SUZUKI, 2004).

Assim, pode-se perguntar: como entender o comportamento geotécnico dos solos coluvionares, a fim de que as movimentações da massa de solo da Serra do Mar não interrompam o transporte nas dutovias?

Sendo um solo coluvionar, formado pela deposição de partículas transportadas de diferentes locais pela ação da gravidade, são encontradas camadas heterogêneas, sendo suas propriedades alteradas ao longo das camadas.

Ao se avaliarem as propriedades físicas do perfil geotécnico, alcança-se um melhor entendimento das movimentações de taludes em regiões serranas com presença de solos coluvionares e residuais.

1.1.OBJETIVO

Esse trabalho tem por objetivo aprimorar o entendimento do comportamento de solos coluvionares da região da Serra do Mar, sendo estudada a encosta da Serra do Mar Paranaense por onde atravessa o Oleoduto OLAPA no seu quilometro 57.

Além do objetivo principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) interpretação geotécnica das sondagens indiretas por geofísica de eletrorresistividade. Com os resultados dos ensaios geofísicos, realizar uma correlação com os dados obtidos em sondagens diretas SPT. Dessa forma poderá ser feito um aprimoramento do conhecimento da estratigrafia, caminhos preferenciais de fluxo e outras características do perfil;
- b) com o resultado da geofísica interpretado com o auxílio do SPT, definir os pontos mais representativos para a coleta de amostras indeformadas e deformadas do subsolo, a fim de se realizar ensaios em laboratório para se determinar as características físicas e de resistência do material;
- c) determinar correlações das propriedades geotécnicas entre os ensaios de geofísicos de eletroresistividade e os ensaios de eletroresistividade em laboratório.

1.2.JUSTIFICATIVA

Em condições ideais, os dutos enterrados estariam expostos apenas aos esforços de pressão interna do fluido transportado, mas essa é apenas uma das componentes do completo estado de tensões nas paredes de um duto. Na realidade há pelo menos cinco fatores que geram tensões nas paredes dos dutos, o processo de montagem, as tensões de origem térmica, as tensões de fabricação, as tensões do fluido e as decorrentes da interação duto com o solo (PEZZOTTA, 2010).

Esse fato evidencia a necessidade de monitorar a estabilidade das encostas, a fim de se minimizar, os efeitos negativos da movimentação do solo nos dutos. Dessa forma, podem ser evitados acidentes que poderiam gerar consequências ambientais (vazamento de combustível no solo), sociais (deslizamento do talude em

moradias) e econômicas (interrupção do fornecimento de combustível para região do porto).

1.2.1. Ambiental

Nessa região, a ocorrência de um deslizamento de terra pode gerar um arraste dos dutos que podem romper e causar vazamento de óleo na região, trazendo danos irreparáveis para o meio ambiente.

Em janeiro de 2001, o oleoduto OLAPA do km 93 que ligava a Refinaria Getúlio Vargas (REPAR) de Araucária ao terminal de Paranaguá vazou cerca de 50 mil litros de óleo diesel na Serra do Mar. O óleo atingiu rios da região chegando ao mar, contaminando a fauna e a flora. A região é de Mata Atlântica, sendo área de proteção ambiental (APA) e área de interesse turístico (AIT). A região atingida por esse desastre é considerada reserva da biosfera pela UNESCO (O ESTADO DO PARANÁ, 2001).

1.2.2. Social

O crescimento desordenado das cidades muitas vezes causa a ocupação de regiões com elevado risco geotécnico, aumentando o número de mortes causadas por deslizamentos. Para se amenizar esses riscos e tornar essas regiões mais seguras, é necessário o conhecimento das características e do comportamento do solo da região.

As prefeituras poderiam realizar um maior controle das regiões de risco, com intervenções técnicas para criar projetos mais confiáveis, para diminuir os transtornos sociais ocasionados em áreas de deslizamento, como a paralisação do comércio, alocação dos habitantes para abrigos provisórios e disponibilização do uso de funcionários públicos e privados no resgate das vítimas.

Além disso, no talude em estudo existe dutovia com risco de vazamento e explosão de derivados de petróleo, podendo ocasionar a perda de vidas humanas. A região contém área de plantio além de fazendas destinadas para o ecoturismo.

1.2.3. Econômica

Os recursos financeiros necessários para amenizar um deslizamento de terra incluem tentativas de resgate de sobreviventes soterrados, elevados custos com obras emergenciais para impedir novos escorregamentos, bem como a posterior recuperação e estabilização da encosta.

Em 2008, um gasoduto se rompeu na BR-470, próximo a Gaspar em Santa Catarina, devido a um deslizamento provocado pela forte chuva na região. A interrupção do abastecimento de gás natural atingiu os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, afetando indústrias, postos de combustíveis, hotéis, residências, entre outros. O Hospital de Clínicas para não interromper o atendimento, passou a adquirir óleo diesel como combustível. Por ser mais caro, gerou um gasto de R\$ 80.000,00 ao hospital, despesa esta que não era esperada (JORNAL DO GLOBO *aput* G1, 2008).

A região de estudo, por ser uma dutovia que se destina à área portuária, causará impactos na exportação de gasolina, gás e óleo diesel, se sofrer uma interrupção no seu abastecimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INSTABILIDADE EM TALUDES COLUVIONARES

Colúvio é definido como sendo um depósito composto por blocos ou grãos de quaisquer dimensões, transportados principalmente por gravidade e acumulados no pé ou a pequena distância do talude. Os tálus são casos particulares dos solos coluvionares, nos quais blocos de rocha não estão envolvidos por uma matriz de solo que se acumulam nos pés das encostas LACERDA (1985) apud EISENBERG (2003).

A formação dos solos coluvionares em vales fechados pode ocorrer de forma contínua e intermitente. O primeiro processo trata-se da erosão superficial, na qual há o carregamento das partículas de solo pelo escoamento superficial das águas das chuvas. O segundo processo é a ruptura de uma massa de solos residual a montante. A presença de escarpas rochosas a montante, o desprendimento e quedas de blocos ou lascas contribuem para a formação de colúvio ou tálus (LACERDA, 2002).

Os colúvios são formados pela deposição dos grãos pela ação da gravidade, podendo haver outros agentes secundários de transporte como o vento e a água. Normalmente, o solo coluvionar é uma mistura de fragmentos de rocha angular e de materiais de grãos finos. Estes depósitos raramente possuem mais que 8 a 10 m de espessura, e geralmente são mais finos perto da crista e mais espessos na base do talude (TURNER; SCHUSTER, 1996).

Os movimentos da massa de solo coluvionar tendem a acelerar após períodos de chuva intensa e quando há infiltração de água no interior do talude, causando aumentos significativos de poropressão e, por consequência redução da tensão efetiva, e por sua vez a ruptura do talude (SILVEIRA, 2003). A Figura 1 ilustra a formação dos solos coluvionares, onde se podem observar as diferentes espessuras das camadas de solo, devido aos diferentes escorregamentos que se sucederam ao longo do tempo.

A velocidade de deposição pode ser bastante variável, sendo muito lenta quando a deposição é feita pela ação do vento, ou extremamente rápida quando da

ocorrência de corrida de detritos (*debris flow*). O fenômeno de corrida de detritos pode se mover com velocidades superiores a 3 m/s (10,8 km/h) e sua composição poderá apresentar não só os materiais do colúvio, que podem variar de grãos finos a matacões, como também materiais orgânicos como árvores e até objetos como carros e estruturas que estiverem no caminho do escorregamento (TURNER;SCHUSTER, 1996).

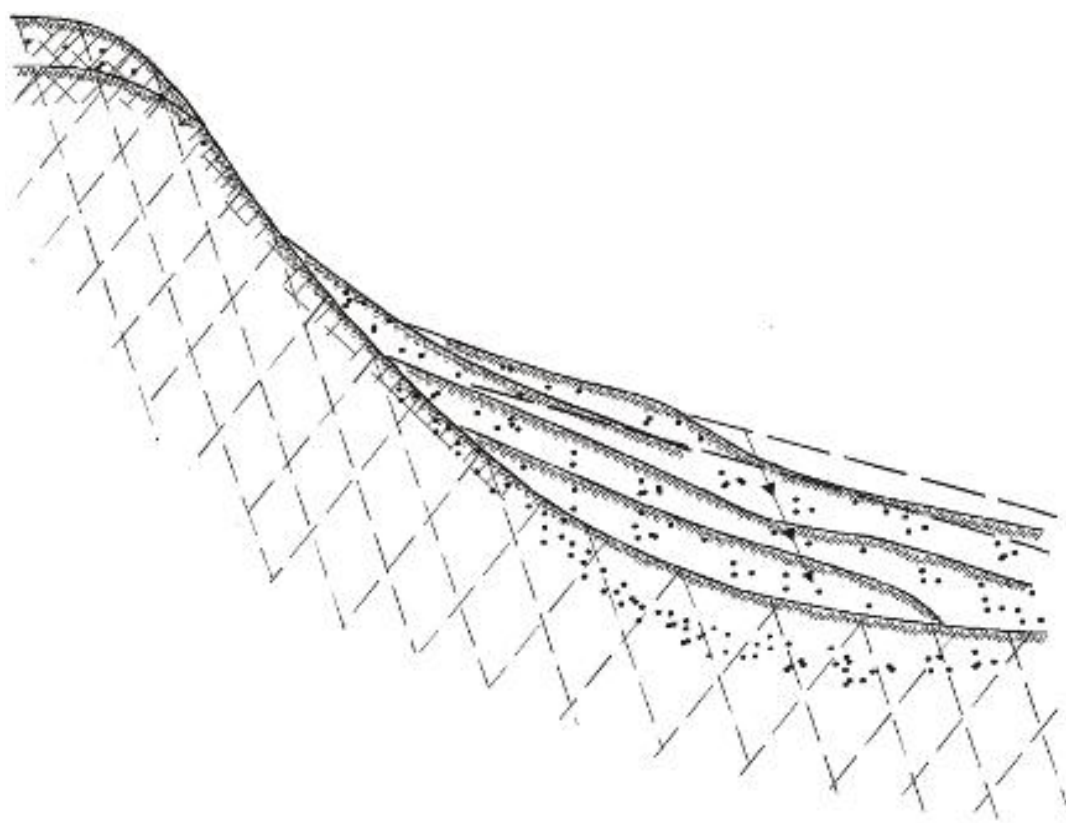


Figura 1 - Formação do solo coluvionar.

Fonte: Deere e Patton (1971) *apud* Massad (2010)

Quando o colúvio é formado por sucessivas corridas de detritos, cada camada de solo fica retrabalhada apresentando zonas mais permeáveis ou uma camada individual mais permeável. As camadas superiores dos colúvios não são somente mais permeáveis para o fluxo horizontal, mas também são mais permeáveis na direção vertical, a qual permite uma rápida infiltração do escoamento superficial (DEER; PATTON, 1971).

Na Serra do Mar, corpos de tálus ocorrem com maior frequência nas porções inferiores e intermediárias das encostas, oriundos de escorregamentos a montante. Em alguns casos, as massas soterram drenagens preexistentes ou bloqueiam nascentes d'água, provocando infiltração das águas de drenagem aprisionadas dentro da massa de tálus. Em tais condições essa massa apresenta movimentos lentos de escoamento sazonal (rastejo), intensificado durante as épocas chuvosas (PINHEIRO, 2000 *apud* EISENBERGER, 2003).

Deer; Patton (1971) classificam instabilidade em colúvios em deslizamentos rasos e profundos. Os deslizamentos rasos são comuns e ocorrem quando a camada superficial de colúvio é mais permeável que as camadas inferiores, formando muitas vezes um lençol d'água suspenso. Essa saturação da massa coluvionar reduz a sua resistência ao cisalhamento e cria forças de percolação estabilizadoras. Durante o período de fortes chuvas, a água pode promover a perda de resistência de partes do colúvio, processo este que pode crescer até o deslizamento de toda a camada de colúvio, ou enquanto as raízes das árvores mantiverem o restante da massa estável. O deslizamento profundo pode ocorrer durante a realização de um corte no pé do talude, ou ainda pode ser iniciado por planos de fraqueza presentes no solo.

A instabilidade em solo coluvionares geralmente envolve componentes distintas de movimento, um leve escorregamento rotacional ou translacional inicial, seguido de fluxo da massa perturbado. Esse tipo de ruptura resulta em uma cicatriz relativamente pequena no início do deslizamento, formando uma longa língua pelo escoamento do solo liquefeito e detritos. Uma quantidade maior de argila significa uma maior coesão e uma menor permeabilidade no solo, isso justifica as diferentes velocidades de escorregamento, podendo variar de poucos segundos a dias (ELLEN; FLEMING, 1987; ELLEN 1988 *apud* TURNER; SCHUSTER, 1996).

Eisenberger (2003) cita que os principais agentes de influência na estabilidade de colúvios são a geomorfologia (espessura de camadas heterogêneas), a hidrologia (chuvas intensas) e a presença de vegetação (aumento da sobrecarga e os caminhos preferenciais para infiltração da água).

2.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo ou rocha, de superfície inclinada, submetida a três forças distintas: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento (CAPUTO, 2000). O estudo de estabilidade dos taludes deve, necessariamente, considerar o equilíbrio entre essas forças, uma vez que as duas primeiras se somam, tendendo a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto a última atua como um freio a essa movimentação (Figura 2). Além do mais, é importante compreender exatamente o mecanismo de atuação de cada força, a fim de projetar corretamente as medidas preventivas aos escorregamentos.

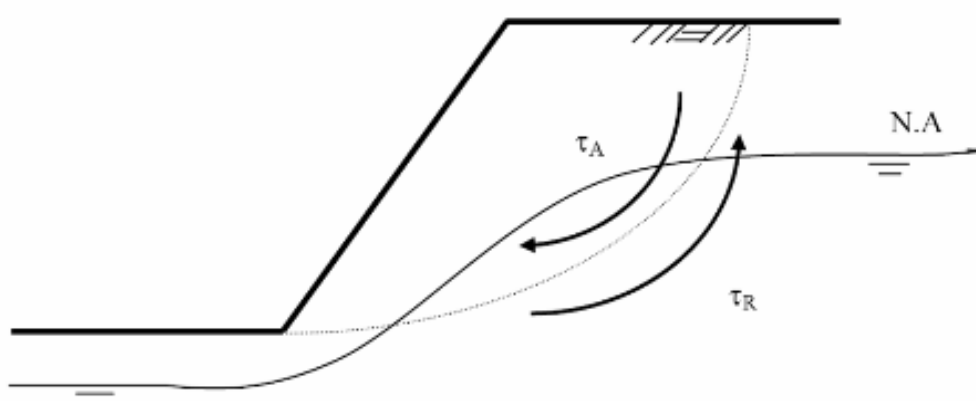


Figura 2 - Equilíbrio entre tensões atuantes e resistentes em um talude.

Na estabilidade de taludes intervêm condicionantes relativos à natureza dos materiais constituintes e dos agentes perturbadores, quer sejam de natureza geológica, antrópica ou geotécnica (FIORI, 2009).

Apesar de uma avaliação precisa da estabilidade não parecer possível por envolver um grande número de parâmetros, não há dúvidas de que uma avaliação quantitativa deve ser feita, de maneira a fornecer ao menos um número relativo que sirva de base para uma melhor compreensão do comportamento e da sensibilidade do talude às mudanças de parâmetros críticos (GUIDICINI, 1984).

A forma da superfície de ruptura depende da geometria do problema, da estratigrafia, das características dos materiais envolvidos e dos métodos de cálculo disponíveis para a análise. Com base nas observações dos escorregamentos na natureza, as análises passaram a considerar a massa de solo como um todo (Método do Círculo de Atrito), ou subdividida em lamelas (Método Sueco), ou em cunhas (Método das Cunhas) (MASSAD, 2010). Como pode ser visto na Figura 3, as superfícies podem ser circulares, em forma de cunha ou não-circulares (qualquer) (USACE, 2003 *apud* TONUS, 2009).

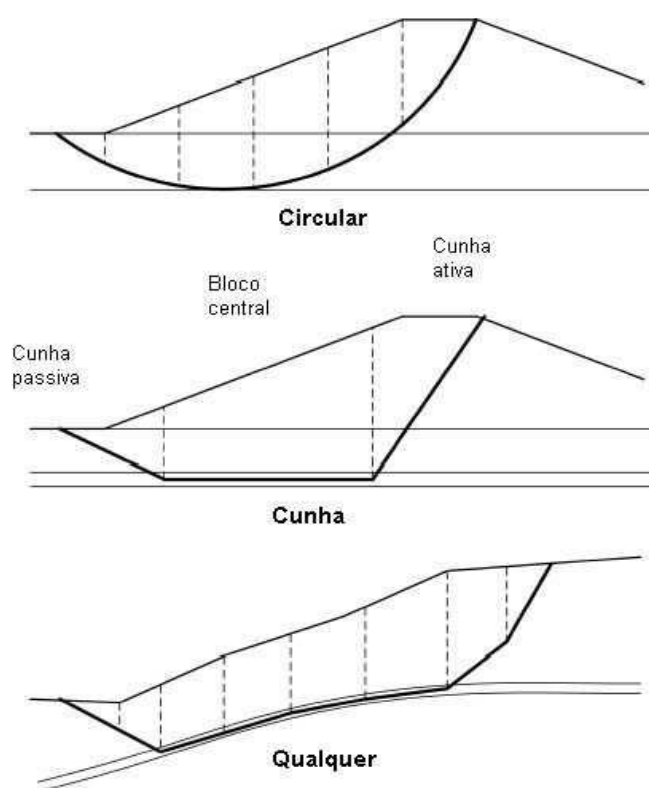


Figura 3 - Superfície crítica de ruptura.

Superfícies circulares são geralmente utilizadas devido à facilidade de cálculo e são representativas em taludes homogêneos ou estáveis com camadas de solo espessas. As superfícies em forma de cunha são definidas por três linhas retas que delimitam três regiões: cunha ativa, bloco central e cunha passiva; são usadas quando o maciço apresenta longos segmentos lineares de material mais fraco. As superfícies não-circulares ou quaisquer são definidas por várias linhas, com diferentes comprimentos e ângulos de inclinação, e são indicadas para materiais anisotrópicos (USACE, 2003 *apud* TONUS, 2009).

Os procedimentos de análise de estabilidade de taludes se caracterizam pela definição de um fator de segurança (F). Eles podem ser obtido de diferentes maneiras, sendo uma delas pela relação entre a resistência ao cisalhamento do solo ($c + \sigma \cdot \tan \phi$) e a tensão cisalhante atuante (τ) ao longo da superfície de ruptura. Pode-se calcular o fator de segurança através da Equação 1.

$$F = \frac{c + \sigma \cdot \tan \phi}{\tau_{eq}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

F = Fator de segurança;

c = Coesão;

ϕ = Ângulo de atrito do solo;

τ = Tensão cisalhante requerida para o equilíbrio.

O fator de segurança definido por (F) é bem adequado para efeitos práticos, porque a tensão cisalhante do solo envolve consideráveis incertezas.

O cálculo do valor de F permite definir superfícies potenciais de ruptura. Quanto menor seu valor, mais provável a ocorrência de deslizamento ao longo da superfície. De todas as superfícies de ruptura possíveis de um deslizamento ocorrer, será considerada como superfície crítica a que tiver o menor valor de F , limitado o valor de $F=1,0$.

Para avaliar a estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite, que supõem a iminência do movimento, é necessário realizar cálculos para um número confiável de possíveis superfícies de deslizamento a fim de determinar a localização da superfície de ruptura crítica.

A estabilidade de taludes é usualmente analisada pelo método de equilíbrio limite. Estas análises exigem informações sobre a resistência do solo, mas não exigem informações sobre seu comportamento tensão-deformação e também não fornecem informação sobre a magnitude dos movimentos da encosta.

Os movimentos de encostas são geralmente analisados pelo método dos elementos finitos. Entender o comportamento tensão-deformação do solo é necessário para estas análises. Embora esses métodos definam os movimentos e as

tensões ao longo da encosta, eles não fornecem uma medida direta da estabilidade, tais como o fator de segurança calculado por meio de análises de equilíbrio limite (TURNER; SCHUSTER, 1996).

A finalidade de se analisar a estabilidade de taludes segundo Dyminski (2003), segue as seguintes etapas:

a) analisar a estabilidade de taludes construídos pelo homem, com diferentes carregamentos, em curto prazo (final de construção) e em longo prazo, a fim de permitir a execução de projetos seguros e econômicos;

b) analisar a possibilidade de escorregamentos de taludes naturais ou construídos, através de análise da sensibilidade do solo a variações de suas características, por exemplo, parâmetros de resistência, condições de fluxo e altura do nível de água;

c) entender o mecanismo de ruptura de escorregamentos ocorridos, através de retroanálise da estabilidade, observando a influência de fatores ambientais e a influência de modificações propostas no projeto;

d) executar projetos de estabilização de taludes rompidos, propondo-se medidas corretivas e investigando-se alternativas de medidas preventivas que possam ser necessárias;

e) estudar o efeito de carregamentos extremos naturais (grandes precipitações pluviométricas, altos gradientes de temperatura, terremoto, maremotos) ou decorrentes da ação do homem (mudança do uso da obra, explosões, execução do projeto);

f) entender a formação dos taludes naturais na crosta terrestre e os fatores responsáveis pelas diferentes características regionais.

Para se analisar a estabilidade de um talude é necessária uma definição da estratigrafia do terreno, sendo o primeiro passo a utilização de sondagens diretas. O método mais empregado devido à sua simplicidade do equipamento e dos procedimentos envolvidos, bem como seu baixo custo é a sondagem SPT (*Standard Penetration Test*), que será descrito a seguir.

2.3. SONDAGEM SPT

O *Standard Penetration Test* (SPT) é o ensaio de investigação geotécnica mais popular em praticamente todo o mundo. Através dele é possível obter-se a estratigrafia do terreno ao longo do furo de sondagem e a resistência à cravação do amostrador padrão aos golpes de um martelo. Pode-se através de correlações, realizar a avaliação da densidade de solos granulares, consistência de solos coesivos, além de uma medida de resistência dinâmica associada à sondagem de reconhecimento.

As amostras representativas de solo são coletadas a cada metro de profundidade, por meio de um amostrador-padrão que permite a descrição tátil-visual da amostra ao longo da sondagem (Figura 4).

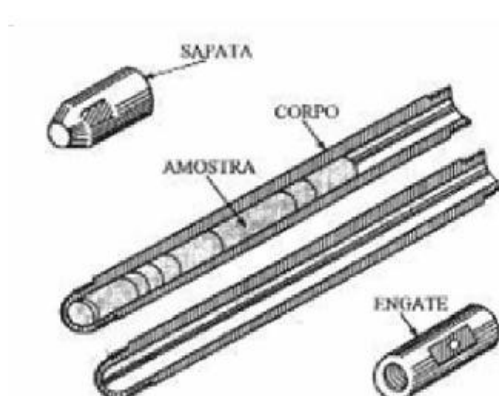


Figura 4 - Amostrador de parede grossa do ensaio SPT.

O procedimento de execução do ensaio consiste na cravação do amostrador-padrão no fundo de uma escavação, usando-se um peso de 65kg caindo sobre o amostrador de uma altura de 750mm (Figura 5).

O número de golpes necessários para cravar o amostrador no solo em 300mm é chamado de N_{SPT} . Existe uma variação nos ensaios de SPT ao longo do mundo, as principais diferenças são a técnica de perfuração, tipo de equipamento e os procedimentos na execução do ensaio, resultando em desuniformidade nos resultados obtidos. Além do processo executivo, temos a influência das características dos solos nas medidas de SPT.

Odebrecht (2003) afirma que embora de uso corrente, o ensaio tem sido objeto frequente de críticas da comunidade acadêmica, que abrangem aspectos relacionados à dispersão de resultados, dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Estas limitações motivaram o desenvolvimento de estudos a partir da década de 70 de medição de energia visando à padronização do ensaio, sendo inúmeras as contribuições nesta área (e.g. SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; KOVACS, 1979,1980,1981; BELINCANTA, 1985,1998; CAVALVANTE, 2002).

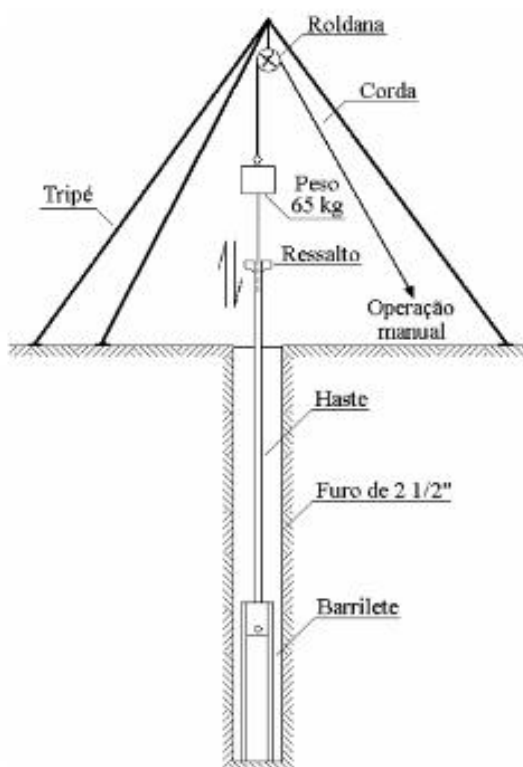


Figura 5 - Ensaio SPT.

Schnaid (2000) apresenta fatores que influenciam os resultados de ensaios realizados segundo recomendações de normas e da boa prática de engenharia. Tais fatores explicam porque no mesmo local, duas sondagens realizadas dentro da técnica recomendada podem resultar em valores desiguais, considerando-se, por exemplo, técnica de escavação, equipamento e procedimento de ensaio.

A normalização do ensaio SPT foi realizada em 1958 pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), sendo mundialmente comum o uso de procedimentos não padronizados e equipamentos diferentes do padrão internacional

considerado como referência (*International Reference Test Procedure – IRTP / ISSMFE*). Na América do Sul, a normalização Norte Americana ASTM D 1586-67 é utilizada com frequência. No Brasil, o ensaio é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas a ABNT NBR 6484/1980.

Odebrecht (2003) apresentou um estudo detalhado da monitoração de energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam estas medidas. O resultado da campanha experimental permitiu o entendimento do processo de cravação do amostrador no solo com a determinação das perdas (eficiências) ocorridas ao longo do processo.

Estes estudos procuraram identificar a influência na medida de penetração N_{SPT} de fatores associados às divergências encontradas a fim de se uniformizar os resultados do valor do N_{SPT} para um valor único de energia, sendo o valor de energia de referência adotado segundo o consenso internacional de 60% da energia teórica produzida pela queda do martelo (SKEMPTON; 1986 IRTP/ISSMFE; 1988 *apud* ODDEBRECHT, 2003).

2.4. SONDAGEM GEOFÍSICA

A ciência da geofísica aplica os princípios da física ao estudo da Terra. A investigação geofísica do interior da Terra envolve medidas em sua superfície ou próxima a ela, medidas estas que são influenciadas pela distribuição das propriedades físicas do solo.

Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações distribuídas em área da geologia de subsuperfície.

Os levantamentos geofísicos de resistividade estão se tornando mais comuns para caracterização da estratigrafia do subsolo, existindo inúmeras vantagens na realização da investigação no estágio inicial das investigações. Entre elas, pode ser citadas primeiramente a possibilidade de fornecer uma avaliação quase contínua de distribuição espacial dos parâmetros medidos e segundo por poder se correlacionar os valores medidos com parâmetros geotécnicos específicos

de interesse. Esse método permite uma visão ampla da distribuição da estratigrafia da formação geológica, tornando-se ideal para complemento com informações de furos de sondagem (RINALDI *et al.*, 2006).

Segundo Kearey *et al.* (2009), a investigação pelos métodos geofísicos é capaz de detectar e delinear características locais de potencial interesse e que não poderiam ser descobertas através das sondagens diretas. Os levantamentos geofísicos não dispensam a necessidade de sondagens diretas, mas se aplicadas corretamente, podem aperfeiçoar as informações sobre a área investigada e minimizar a necessidades delas.

Assim sendo, através da geofísica é possível investigar a subsuperfície utilizando medidas indiretas, geralmente realizadas na superfície do terreno. Estas medidas correspondem a uma determinada propriedade física do meio investigado. A eficácia de um levantamento está condicionada à existência de contrastes dos valores da grandeza física mensurada. Especificamente, são as anomalias relativas, melhores que os valores absolutos medidos, que interessam em uma investigação geofísica (GANDOLFO *et al.*, 2010).

Segundo Gandolfo *et al.* (2010) a geofísica pode ser classificada em dois grandes ramos de atuação: a geofísica pura e a geofísica aplicada. A geofísica pura concentra seus estudos em uma escala global, investigando grandes profundidades do planeta. Já a geofísica aplicada está restrita a profundidades menores, de dezenas a centenas de metros.

Segundo Kearey *et al.* (2009), os métodos de levantamento geofísico são divididos em dois tipos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra e aqueles que envolvem a aplicação de uma energia artificial na superfície do solo.

Os métodos de campo naturais utilizam os campos gravitacionais, magnéticos, elétricos e eletromagnéticos da Terra, detectando por perturbações localizadas que possam ser causadas por características geológicas ocultas.

Os métodos de fontes artificiais envolvem a geração de campos elétricos ou eletromagnéticos locais - que possam ser usados de modo semelhante ao campo natural - ou a geração de ondas sísmicas, cuja velocidade de propagação e caminhos de transmissão através das camadas de subsuperfície são mapeados para fornecer informações sobre a distribuição das camadas em profundidade.

Geralmente, métodos de fontes naturais podem fornecer informações sobre as propriedades em profundidades significativamente maiores e são logisticamente mais simples de executar que os métodos de fontes artificiais. Entretanto, os métodos de fontes artificiais são capazes de produzir um perfil mais detalhado e melhor refinamento da geologia do subsolo.

Existem inúmeros métodos de levantamentos geofísicos e para cada um deles há uma propriedade física “predominante” à qual o método é sensível. Os principais métodos estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Métodos geofísicos

Método	Parâmetro Medido	Propriedades Físicas
Sísmico	Tempos de percurso de ondas sísmicas refletidas/refratadas	Densidade e módulo elástico, os quais determinam a velocidade de propagação de onda sísmica
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Elétrico		
Resistividade	Resistência da Terra	Condutibilidade elétrica
Polarização induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependente da frequência	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétricas
Radar	Tempos de percursos de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

Fonte: Reynolds, 1997.

Os diferentes métodos geofísicos são classificados de acordo com a propriedade física que os mesmos investigam. As rochas e os solos diferem em termos de suas propriedades físicas, provocando variações nos campos físicos e na propagação de ondas que atuam sobre eles.

Como os vários métodos geofísicos dependem de diferentes propriedades do subsolo, é importante que a técnica adequada seja usada para cada aplicação. A Tabela 2 lista os métodos e suas principais aplicações.

Tabela 2 - Métodos geofísicos e suas principais aplicações.

Fonte: adaptado de Reynolds (1997).

Método Geofísico	Propriedade física dependente	Aplicações									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravimétrico	Densidade	P	P	s	s	s	s	!	!	s	!
Magnético	Susceptibilidade magnética	P	P	P	s	!	m	!	P	P	!
Refração sísmica	Módulo de elasticidade; densidade	P	P	m	P	s	s	!	!	!	!
Reflexão sísmica	Módulo de elasticidade; densidade	P	P	m	s	s	m	!	!	!	!
Resistividade	Resistividade	m	m	P	P	P	P	P	s	P	m
Potencial espontâneo	Diferença de potencial	!	!	P	m	P	m	m	!	!	!
Polarização induzida	Resistividade, potencial	m	m	P	m	s	m	m	m	m	m
Eletromagnético (EM)	Condutância, indutância	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m
Radar de penetração no solo (GPR)	Permissividade	!	!	m	P	P	P	s	P	P	P

Legenda:

P = método principal;

s = método secundário;

m = pode ser utilizado, mas não é a melhor abordagem;

! = não aplicável.

Aplicações:

1. Exploração de hidrocarbonetos (carvão, gás, óleo),
2. Estudos geológicos regionais (área acima de centenas de km),
3. Exploração / desenvolvimento de depósitos minerais,
4. Investigação locais de engenharia,
5. Investigações hidrogeológicas
6. Detecção de cavidades na subsuperfície,
7. Mapeamento de pluma de contaminação e lixiviados,
8. Localização e definição de objetos metálicos enterrados,
9. Arqueologia,
10. Geofísica forense.

Pode-se observar na Tabela 2 anterior que os principais métodos de investigação do subsolo para a engenharia são os métodos de refração sísmica, resistividade elétrica, eletromagnético e o sistema GPR, que serão descritos a seguir.

2.4.1. Geofísica pelo método sísmico

O método sísmico baseia-se na emissão de ondas mecânicas geradas artificialmente (Figura 6) através do impacto de explosões, tiros de ar comprimido, impactos mecânicos ou vibradores. Essas ondas penetram a certas profundidades no interior da Terra, e se tornam maiores à medida que a energia liberada no impacto for maior. Durante esse trajeto, as ondas atravessam camadas geológicas com diferentes características físicas, sofrendo assim reflexão e refração. Parte da energia contida em uma onda será refletida na interface entre duas camadas geológicas, e o restante continuará o seu caminho, mas com um ângulo diferente (ELIS, 2012).

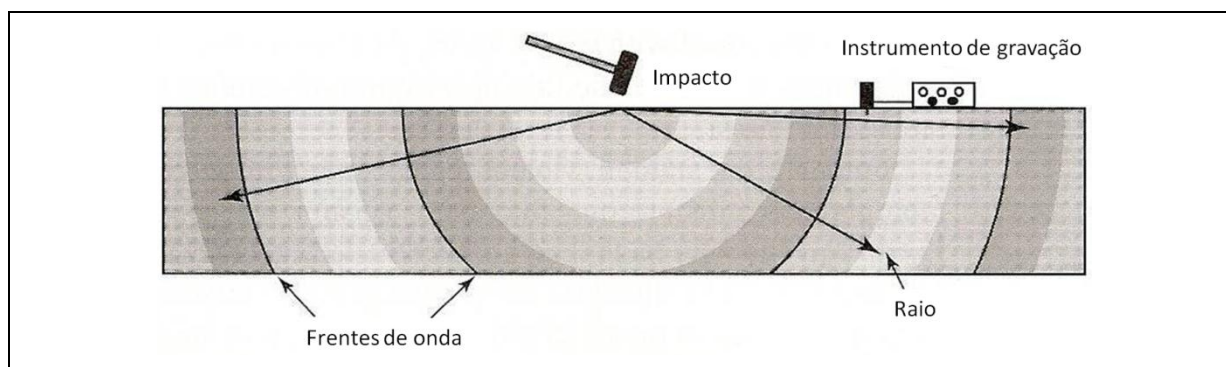


Figura 6 - Ondas sísmicas geradas artificialmente.

Fonte: Burher *et al.*, 1992.

As ondas sísmicas são detectadas por instrumentos capazes de perceber os movimentos do solo por ocasião de sua passagem. Esses instrumentos são chamados geofones ou hidrofones, quando usados nos oceanos ou lagos. Um geofone consiste essencialmente de uma bobina cilíndrica feita com um arame fino suspensa em uma cavidade cilíndrica dentro de um ímã, como mostram a Figura 7.

A bobina e o ímã são montados com um estojo de proteção, geralmente de plástico, que possui uma longa ponta de metal para fixar o geofone no solo. Quando o movimento acontece, o geofone se move, induzindo um movimento relativo entre o ímã e a bobina, gerando uma tensão proporcional à quantidade de deslocamento. Essa tensão é lida pelo equipamento, constituindo um sinal primário antes do processamento eletrônico.

O tempo percorrido entre a fonte sendo disparada e a chegada das várias ondas é então usado para determinar a natureza das camadas do subsolo.

Gravações sofisticadas e posterior processamento de dados permitem análises detalhadas das ondas sísmicas. A informação derivada é usada no desenvolvimento de imagens da estrutura do subsolo e no conhecimento das propriedades físicas dos materiais presentes (REYNOLDS, 1997).

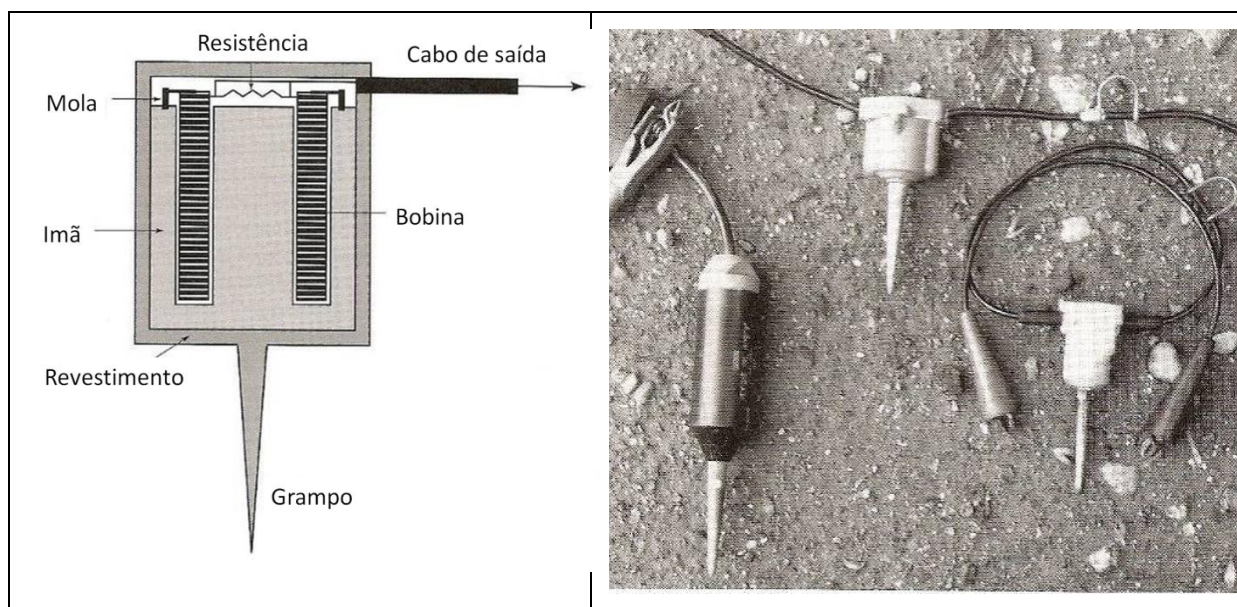


Figura 7 - Esquema do geofone e geofones utilizados para levantamentos rasos
Fonte: adaptado de Burger *et al.* (1992).

A Figura 8 mostra uma representação dos componentes básicos do equipamento de exploração sísmica.

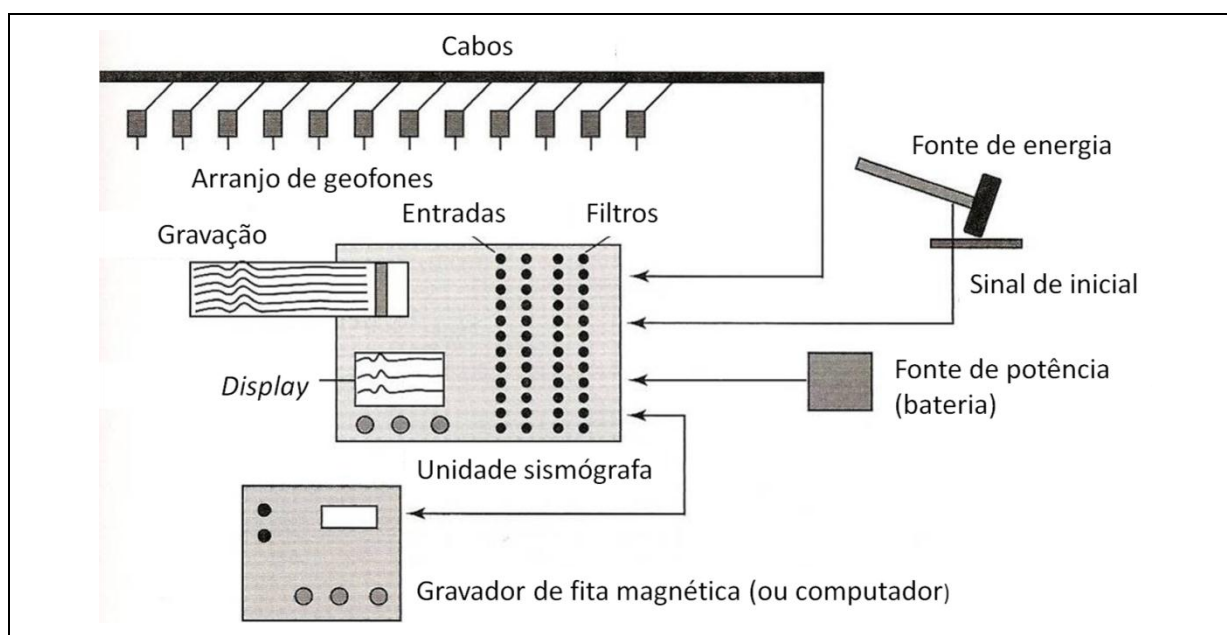


Figura 8 - Representação equipamento de exploração sísmica.
Fonte: Burger *et al.* (1992).

Existem dois métodos sísmicos principais: refração e reflexão. Desde os anos 80, tem ocorrido uma grande mudança em relação ao uso de sísmica de reflexão de alta resolução em investigações rasas, ou seja, com profundidades menores que 200 metros e especialmente menores que 50 metros.

As leis que governam a reflexão e a refração são as mesmas ou muito similares às da ótica. Na reflexão (Figura 9), o ângulo de incidência da onda é igual ao ângulo de reflexão. A refração é governada pela lei de Snell (Figura 10), ou seja, a relação dos senos dos ângulos de incidência e de refração é igual à relação da velocidade da onda incidente e da onda refratada.

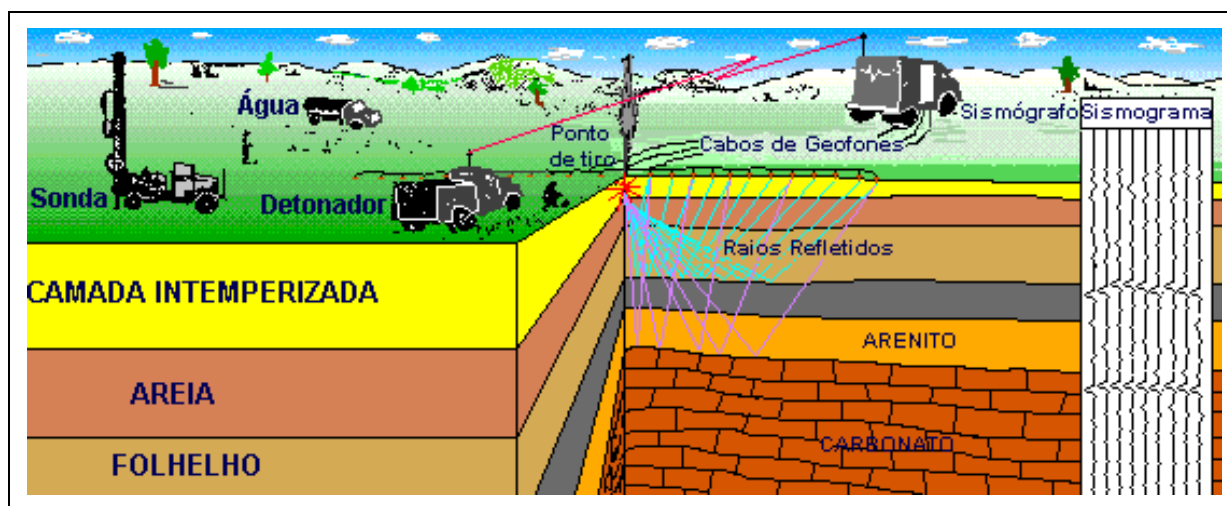


Figura 9 - Esquema do ensaio sísmico de reflexão.
Fonte: Bertulani (2012).

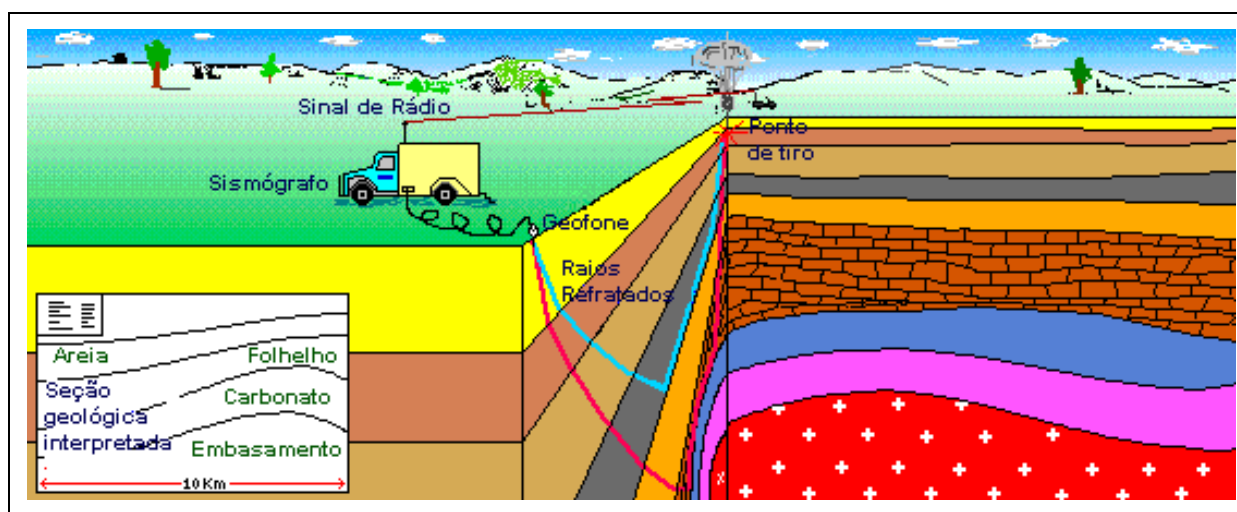


Figura 10 - Esquema do ensaio sísmico de refração.
Fonte: Bertulani (2012).

Dependendo dos objetivos da pesquisa, pode-se optar por analisar as ondas refletidas (métodos sísmico de reflexão) ou as ondas refratadas (método sísmico de

refração). No primeiro caso, as sucessivas reflexões irão fornecer mais detalhes das camadas geológicas, sendo o método mais empregado na prospecção de hidrocarbonetos (petróleo e gás). No método da refração, as ondas viajam grandes distâncias antes de serem detectadas pelos geofones, por isso contêm informações de grandes áreas, mas com menos detalhes (BERTULANI, 2012).

As velocidades das ondas sísmicas dependem da densidade das rochas pelas quais as ondas circulam e de suas propriedades elásticas. Para baixos níveis de energia, as rochas se deformam durante a passagem da onda, mas voltam ao seu estado normal logo após. Isto quer dizer que a rocha não se deforma permanentemente, apresentando, portanto, características elásticas. Próximo às fontes sísmicas, sejam elas naturais ou artificiais, onde a energia é mais intensa, a rocha pode sofrer deformação permanente.

Segundo Reynolds (1997) algumas informações derivadas da sismologia e sua aplicação são:

- Características geológicas:
 - Profundidade do leito rochoso,
 - Localização de falhas e zonas de fraturas,
 - Deslocamento de falhas,
 - Localização e características de vales enterrados,
 - Determinações litológicas,
 - Estratigrafia,
 - Localização de diques ígneos básicos.
- Informações:
 - Módulo de elasticidade,
 - Densidade,
 - Atenuação,
 - Porosidade,
 - Velocidades das ondas elásticas,
 - Anisotropia.
- Aplicações:
 - Investigações locais para engenharia,
 - Detecção de cavidades,
 - Integridade do solo oceânico,
 - Adequabilidade local para construção de aterros, prédios, marinas e piers, emissários, túneis, etc,
 - Exploração hidrogeológica e de água subterrânea,
 - Velocidades de partículas.

2.4.2. Geofísica por radar de penetração no solo (GPR)

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio entre 10 e 1000 MHz, para localizar estruturas e feições geológicas rasas. A metodologia consiste em obter uma imagem de alta resolução através da emissão de um curto pulso de alta frequência para gerar ondas eletromagnéticas que são irradiadas por uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, no caso, condutividade elétrica e permissividade dielétrica, que variam principalmente com o conteúdo de água no solo (PORSANI, 1999). A mudança nas propriedades elétricas em subsuperfície faz com que parte do sinal seja refletido. As ondas refletidas e difratadas em diferentes interfaces são recebidas por uma antena receptora colocada na superfície do terreno. O resultado final é uma imagem de que permite identificar as diversas interfaces presentes no local.

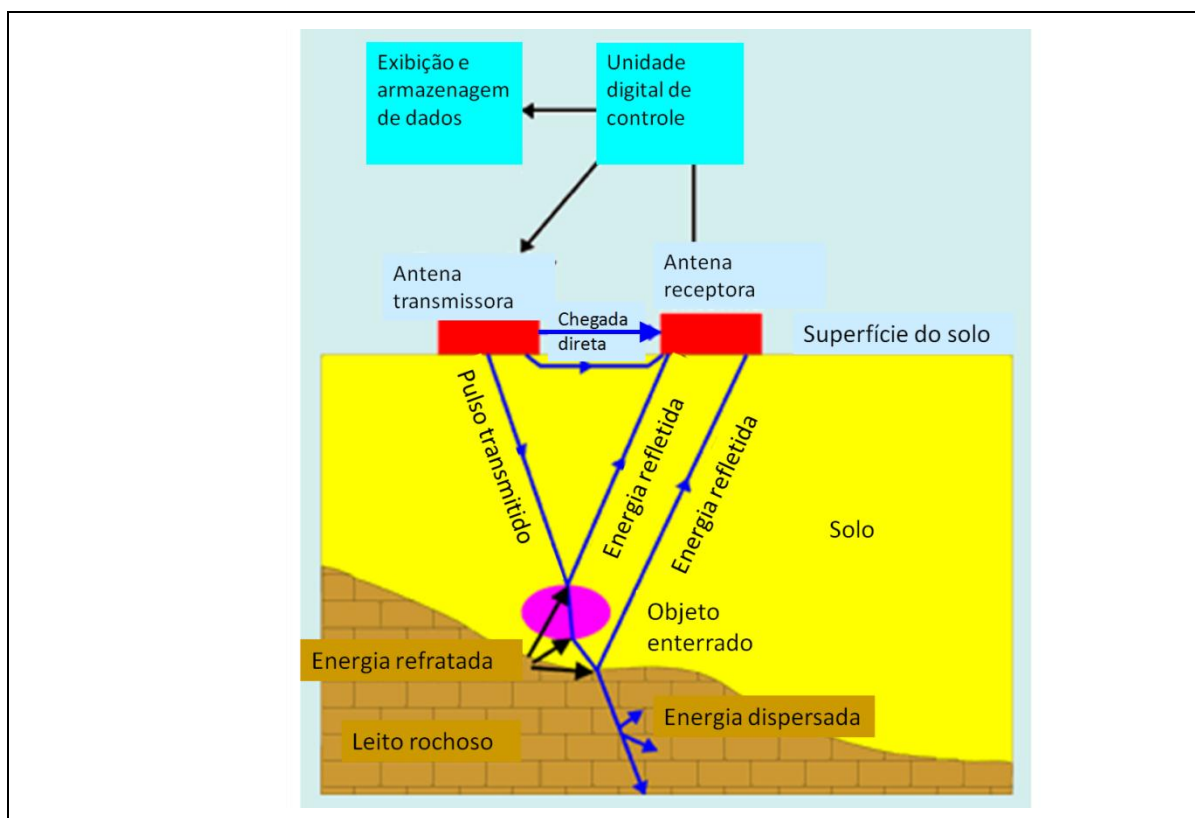


Figura 11 - Esquema de funcionamento do método GPR.

Fonte: adaptado de Empec (2010).

Como resultado tem-se seções contínuas dos perfis executados, imageando as feições em subsuperfície. A energia transmitida (onda eletromagnética) é refletida

a partir das estruturas em subsuperfície, ou em diferentes contatos entre materiais geológicos distintos. Quando o sinal é transmitido em profundidade e atinge corpos ou estratos com diferentes permissividades dielétricas (ϵ), parte da onda reflete nesses objetos ou interfaces sendo captada na antena receptora, enquanto outra parte da energia se propaga até a próxima descontinuidade, como ilustra a Figura 11 (GPR, 2010).

As aplicações do georradar ou radar de penetração do solo (GPR) podem ser divididas em duas classificações, baseadas nas frequências da antena principal. Para aplicações geológicas, onde a profundidade de penetração tende a ser mais importante que uma resolução ótima, são utilizadas frequências menores ou iguais a 500MHz. Para aplicações relacionadas à engenharia ou testes não destrutivos, frequências de 500MHz ou maiores são usadas, tipicamente até 900MHz ou 1 GHz (REYNOLDS, 1997).

As principais aplicações do método elétrico de resistividade são GPR:

- Determinação da profundidade, espessura e caracterização de sedimentos, solos e rochas;
- determinação de fraturas, fissuras e recalques;
- mapeamento de estruturas arqueológicas e localização de feições fossilizadas;
- mapeamento do subleito abaixo de lâmina d'água em rios, lagos e represas e estimativa da profundidade do nível d'água local;
- localização de áreas cársticas e de canais subterrâneos;
- exploração de aquíferos subterrâneos;
- determinação da interface água doce/salgada (cunha salina);
- delimitação de plumas de contaminação de solo e água subterrânea por compostos inorgânicos e orgânicos;
- identificação de vazamento ou infiltração de produtos;
- identificação de infiltração em barragens;
- identificação de dutos, galerias de utilidades, valas e cabos elétricos subterrâneos;
- exploração mineral;
- localização de resíduos, tambores e tanques enterrados;
- avaliação de pavimentação de ruas, rodovias, aeroportos e de leitos de ferrovias.

2.4.3. Geofísica de eletrorresistividade

Medições elétricas de vários tipos são feitas na superfície terrestre com a finalidade de se investigarem as condições de subsuperfície de certa área. Correntes elétricas (I) são introduzidas no solo artificialmente e as diferenças de potenciais são medidas na superfície (KEAREY *et al.*, 2009). As anomalias ou não homogeneidades do solo desviam a corrente e distorcem os potenciais. Este é o princípio básico da medição da variação da resistividade elétrica em subsuperfície (SHARMA, 1997).

A fonte de corrente artificial é introduzida no solo através de dois eletrodos (denominados A e B ou eletrodos de corrente) com o objetivo de medir a diferença de potencial resultante (V) em outros dois eletrodos (denominados M e N ou eletrodos potenciais) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície, como mostra a Figura 12.

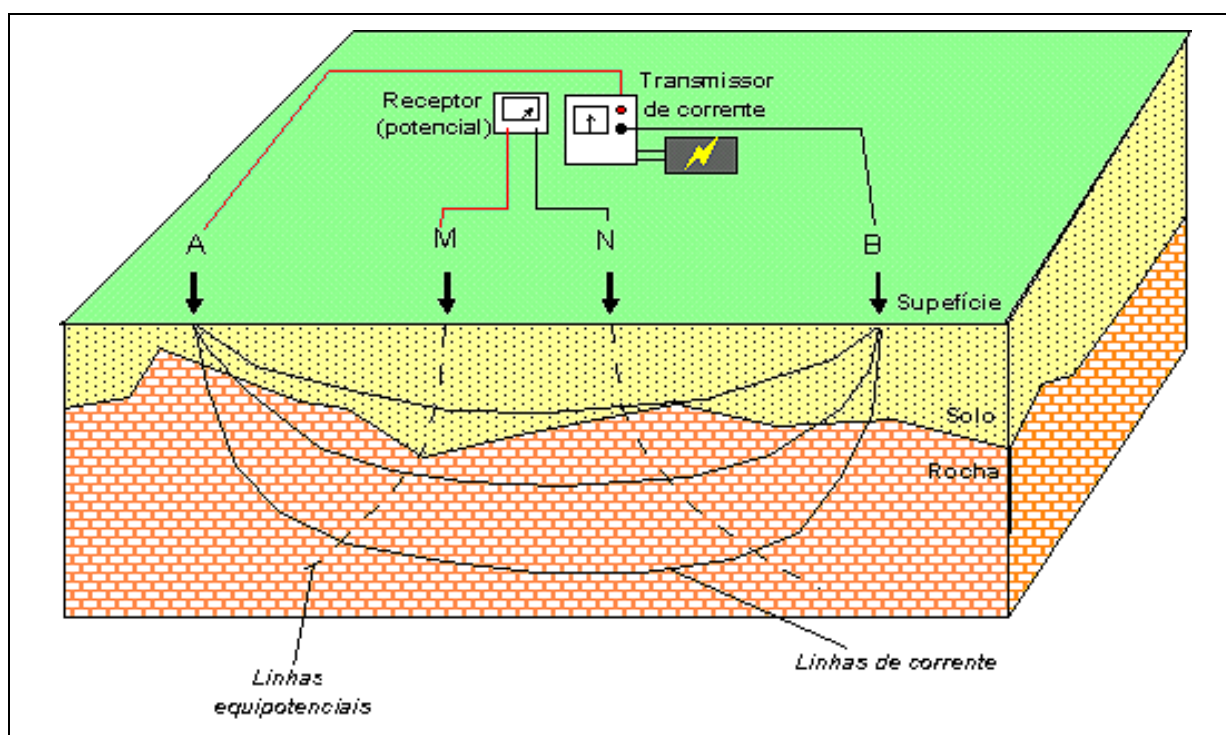


Figura 12 - Esquema de funcionamento do ensaio elétrico de resistividade.
Fonte: Elis (2012)

A resistividade aparente é calculada a partir dos valores de corrente elétrica (I) e do potencial resultante (V), obtidos segundo a Equação 2:

$$\rho_a = k * \frac{V}{I} \quad \text{Equação 2}$$

O fator k depende apenas da disposição dos eletrodos A, B, M e N. A resistividade aparente (ρ_a) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espaço, para a qual contribuem os valores da resistividade em cada ponto e a disposição geométrica dos eletrodos.

A propriedade de resistência elétrica de um material é geralmente expressa em termos de resistividade, cuja unidade no SI é o ohm.metro (Ωm). A resistividade constitui um parâmetro extremamente variável, não existindo uma correlação entre ela e a litologia. Entretanto, uma classificação geral é possível segundo a qual argilas (*clays*) e folhelhos (*shales*), areias (*sands*) e cascalhos (*gravel*), arenitos (*sandstone*) e calcários (*limestone*) e rochas cristalinas inalteradas estão em ordem crescente de resistividade. A Figura 13 apresenta o intervalo aproximado da resistividade de alguns materiais.

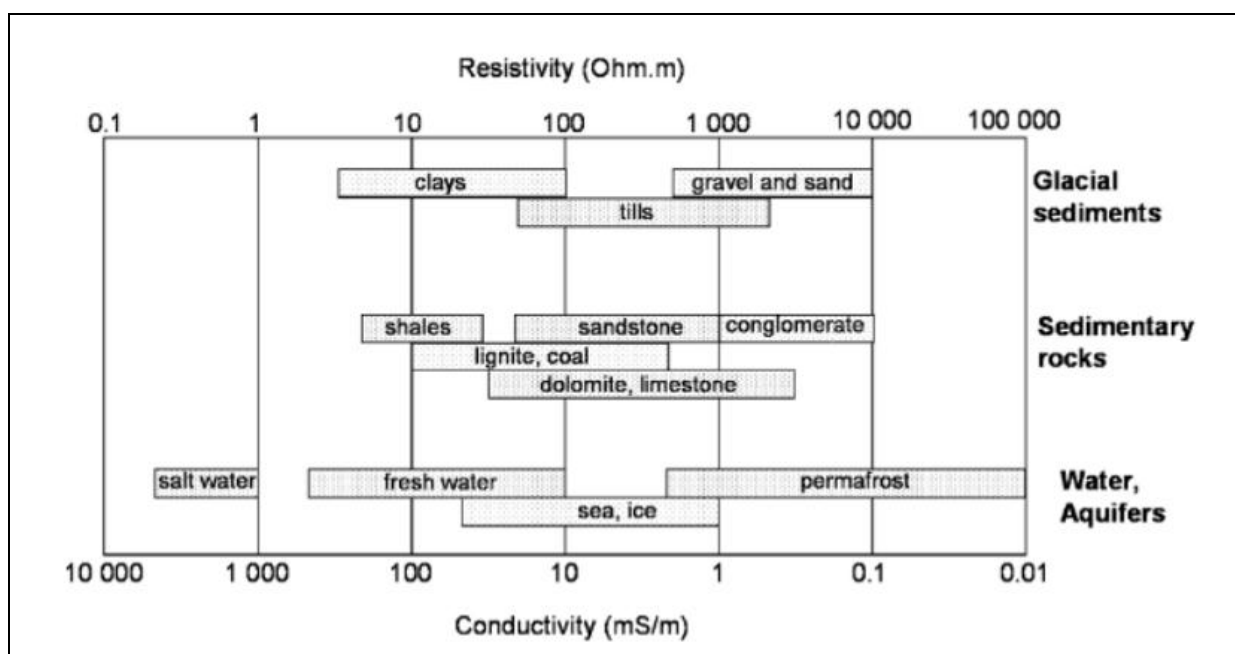


Figura 13 - Resistividade elétrica para diferentes materiais.
Fonte: Samouëlian *et al.* (2005)

Os componentes necessários para fazer as medições de resistividade incluem uma fonte de energia, equipamentos para medir corrente e tensão (que podem ser combinados com os para medir resistência), além de eletrodos e cabos (TELFORD *et al.*, 1990). Nesse aspecto, essa técnica é superior, pelo menos teoricamente, aos outros métodos elétricos, pois apresenta resultados quantitativos, além de utilizar fonte controlada e de dimensões específicas. Como em outros métodos geofísicos, o potencial máximo não é atingido devido à alta sensibilidade a pequenas variações da condutividade perto da superfície.

A fonte de energia é geralmente uma fonte geradora de centenas de watts ou de alguns quilowatts. Para se aplicar uma corrente contínua ao solo pode-se utilizar uma ou mais baterias. Para evitar efeitos de polarização eletrolítica causada por uma corrente unidirecional, a polaridade da corrente contínua deve ser revertida periodicamente (TELFORD *et al.*, 1990). A profundidade atingida depende do meio que a corrente elétrica atravessa e da distância entre os eletrodos de corrente, sendo que quanto maior for essa separação, maiores profundidades poderão ser investigadas e menor será a sua resolução.

Técnica clássica de levantamentos de resistividade é o caminhamento elétrico (CE), segundo Burger *et al.* (1992). Os modelos para os eletrodos utilizados em pesquisas de resistividade são geralmente os de Wenner, Schlumberger, ou dipolo-dipolo.

O arranjo de Wenner é ilustrado na Figura 14, onde se pode observar o igual o espaçamento (a) entre os eletrodos de corrente (C) e os eletrodos potenciais (P).

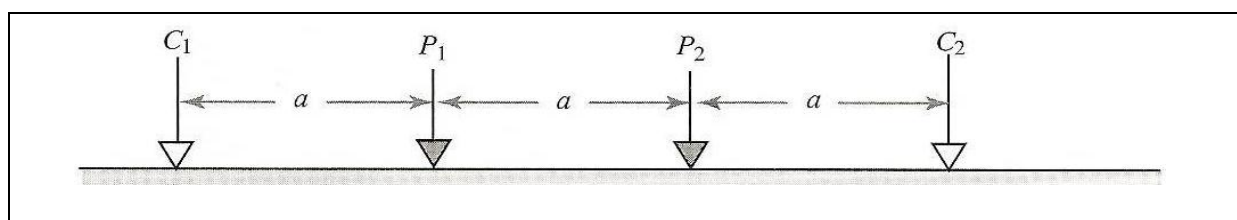


Figura 14 - Configuração de Wenner.
Fonte: Burger *et al.* (1992).

Ao se conduzir uma pesquisa mais ampla, todos os eletrodos são movidos ao longo de uma linha reta após cada leitura, pois assim o espaço entre eles permanece igual e assume determinados valores pré-selecionados. Geralmente, tenta-se atingir valores de a que sejam igualmente espaçados em escala logarítmica

(por exemplo, 10.0, 14.7, 21.5, 31.6, 46.4 e 68.1). A utilização dos intervalos entre eletrodos recomendados produzirá pontos igualmente espaçados em um gráfico dos dados de campo.

Uma distribuição simétrica também é utilizada no modelo de Schlumberger (Figura 15), porém, os eletrodos potenciais (P) se encontram mais próximos que os eletrodos de corrente (C), sendo o espaçamento entre os eletrodos (L) variáveis durante o ensaio.

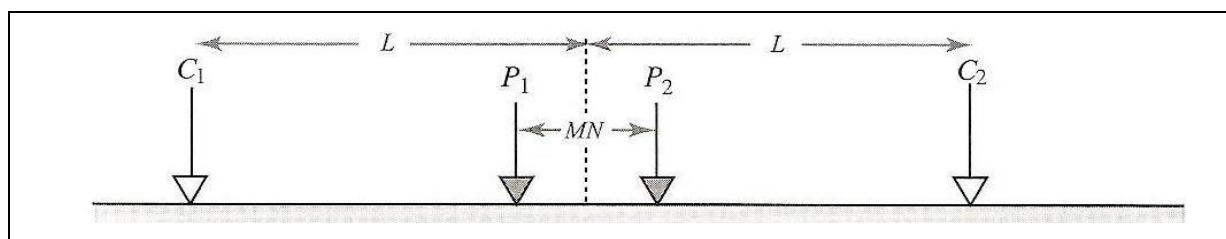


Figura 15 - Configuração de Schlumberger.
Fonte: Burger *et al.*(1992).

Durante a realização do ensaio, mantém-se fixo o espaçamento dos eletrodos de potencial fixo, enquanto a separação entre os eletrodos de corrente é expandida com o objetivo de se obter informações mais profundas da seção geolétrica. Os espaçamentos são selecionados para manter a relação de $2L > 5MN$, seguindo o mesmo esquema de numeração do modelo de Wenner. Devido a essa geometria em particular, a sensibilidade do contador é excedida após o aumento sucessivo entre o espaçamento dos eletrodos. Neste momento, o espaçamento dos eletrodos potenciais é aumentado para o próximo maior valor no esquema numérico e o espaçamento L dos eletrodos de corrente é reduzido em dois intervalos.

O último modelo é o dipolo-dipolo (Figura 16), no qual os eletrodos potenciais (P) e eletrodos de corrente (C) funcionam de forma independente.

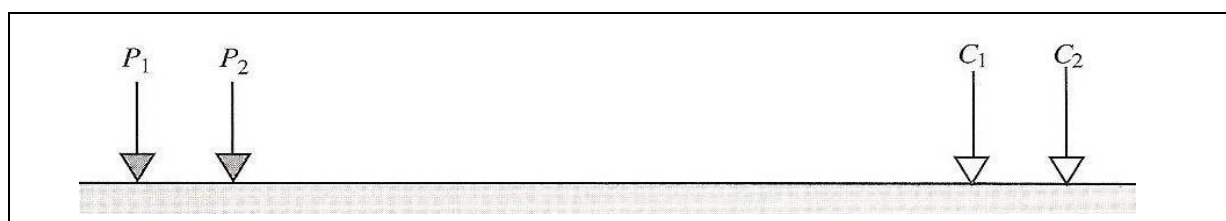


Figura 16 - Configuração dipolo-dipolo.
Fonte: Burger *et al.*(1992).

Como o comprimento do cabo entre os eletrodos é pequeno, é mais fácil posicionar os eletrodos potenciais a maiores distâncias dos eletrodos de corrente, realizando investigações com maiores profundidades. Ao mesmo tempo, correntes maiores são necessárias para alcançar essas profundidades. Segundo Silva Junior *et al.* (2006), essa técnica fornece informações sobre variações laterais e verticais de resistividade.

Os diferentes tipos e estilos de configuração dos eletrodos possuem vantagens, desvantagens e sensibilidades particulares. O espaço disponível e a magnitude do trabalho são alguns dos fatores que influenciam na escolha do tipo de arranjo a se utilizar. Outras considerações importantes são a sensibilidade a heterogeneidades laterais e as interfaces (REYNOLDS, 1997).

A Figura 17 mostra um exemplo gráfico das diferentes respostas das três principais configurações de eletrodos dadas pelas chamadas “seções de contribuição do sinal”. Essas seções são contornos da contribuição feita por cada unidade de volume da subsuperfície à tensão medida na superfície.

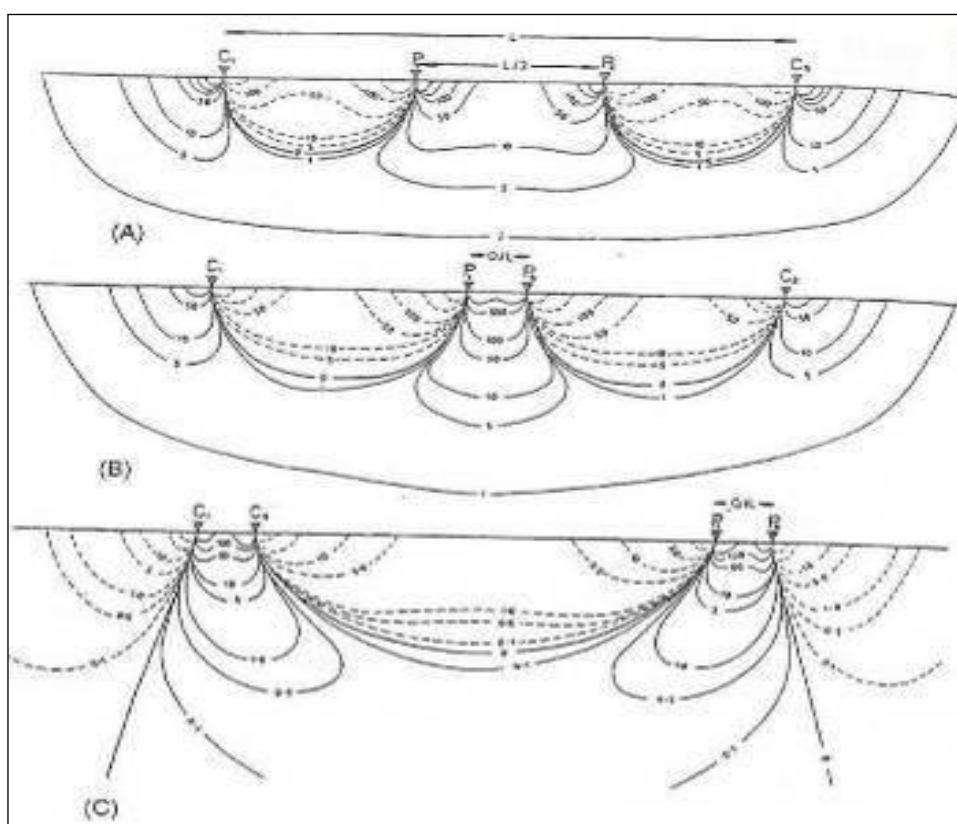


Figura 17 - Seções de contribuição do sinal para diferentes configurações. (A) Wenner (B) Schlumberger (C) dipolo-dipolo. Fonte: Reynolds (1997).

Observa-se que na região perto da superfície na configuração de Wenner, as áreas positivas e negativas se anulam e a resposta principal, originada pelas profundidades, é plana em grande parte. Isso indica que, para camadas horizontais, esse arranjo possui uma alta resolução vertical.

Por sua vez a configuração de Schlumberger possui uma resolução vertical quase tão alta quanto à de Wenner, mas a contribuição do sinal a profundidades é côncava para cima (BURGER *et al.*, 1992). Ao optar-se por esse método se pressupõe que a subsuperfície consiste de camadas planas horizontais. Neste caso, a resistividade varia apenas com a profundidade, mas não lateralmente, e um modelo unidimensional é usado para interpretar as medições. Apesar desta limitação, este método tem produzido resultados úteis em situações geológicas onde o modelo unidimensional é aproximadamente verdadeiro, por exemplo, a determinação da profundidade do lençol freático (SILVA JUNIOR *et al.*, 2006).

Para o arranjo dipolo-dipolo, a forma da contribuição do sinal indica uma resolução vertical pobre e que o arranjo é particularmente sensível às variações laterais profundas de resistividade (BURGER *et al.*, 1992).

Segundo Kearey *et al.* (2009), o levantamento de resistividade é eficiente por delinear sequências das camadas rasas ou descontinuidades verticais envolvendo mudanças de resistividade, sendo suas principais limitações:

- as interpretações são ambíguas. Consequentemente, controles geológicos e geofísicos independentes são necessários para discriminar entre interpretações alternativas válidas dos dados de resistividade;
- a interpretação é limitada a formatos estruturais simples. Quaisquer desvios dessa situação simples podem ser impossíveis de interpretar;
- os efeitos das variações de resistividade próximas à superfície podem mascarar os efeitos de variações profundas;
- a profundidade de penetração do método é limitada pela energia elétrica máxima que pode ser introduzida no solo e pelas dificuldades físicas de se estender longos comprimentos de cabo. O limite prático de profundidade para a maior parte dos levantamentos é de cerca de 1 km.

Outra limitação apontada é o teor de umidade do solo, pois ele altera de forma significativa a resistência elétrica do solo. A obtenção da resistividade em campo, através de métodos tradicionais, pode levar a valores muito variados dependendo das condições de umidade do solo. Medidas realizadas em períodos secos podem indicar valores totalmente diferentes dos obtidos após períodos de chuva. Observa-se que o solo saturado com água se encontra em sua resistividade próxima à mínima.

2.4.3.1. Processamento dos dados arranjo dipolo-dipolo

Uma seção esquemática das leituras da geofísica é ilustrada na Figura 18 onde se pode observar através do caminhamento elétrico o arranjo dipolo-dipolo indicando os eletrodos de corrente (Transmissor AB), e os de potencial (Receptor MN), linhas de equipotencial (Receptor MN), linhas de equipotencial de corrente e os níveis teóricos de investigação.

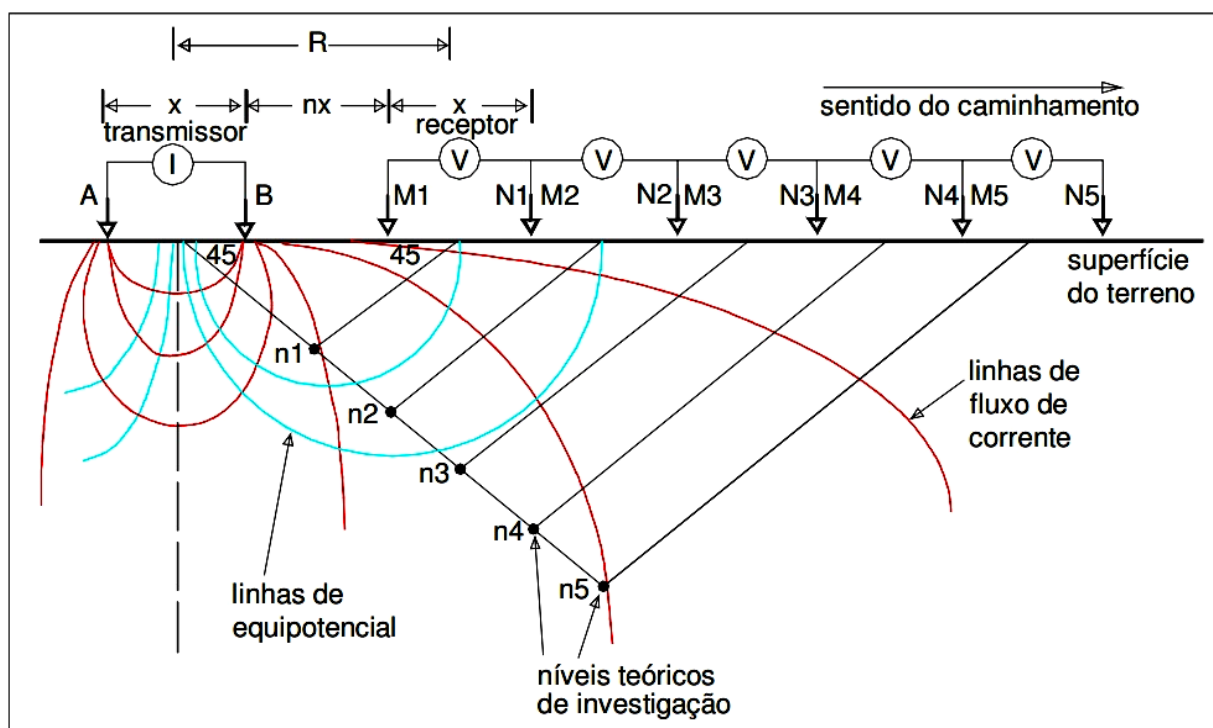


Figura 18 - Procedimento do caminhamento elétrico através do arranjo dipolo-dipolo.
Fonte: Burger *et al.* (1992).

O ensaio consiste em realizar pontos de leituras (interseções) a partir de posições sucessivas do transmissor ao longo do caminhamento. Na Figura 19, observa-se, para cada posição do transmissor tem-se um conjunto de pontos (a), que por sua vez é repetido com o deslocamento do transmissor ao longo da linha (b). Essa forma de apresentação dos dados é denominada de pseudo-seção, o que permite que os valores de resistividade aparente sejam contornados (c), gerando uma imagem da posição relativa ao posicionamento das fontes de corrente elétrica. Entretanto tais correntes elétricas não refletem o posicionamento real das fontes, mas uma aproximação de onde uma determinada fonte pode estar situada e se a mesma é relativamente rasa ou profunda.

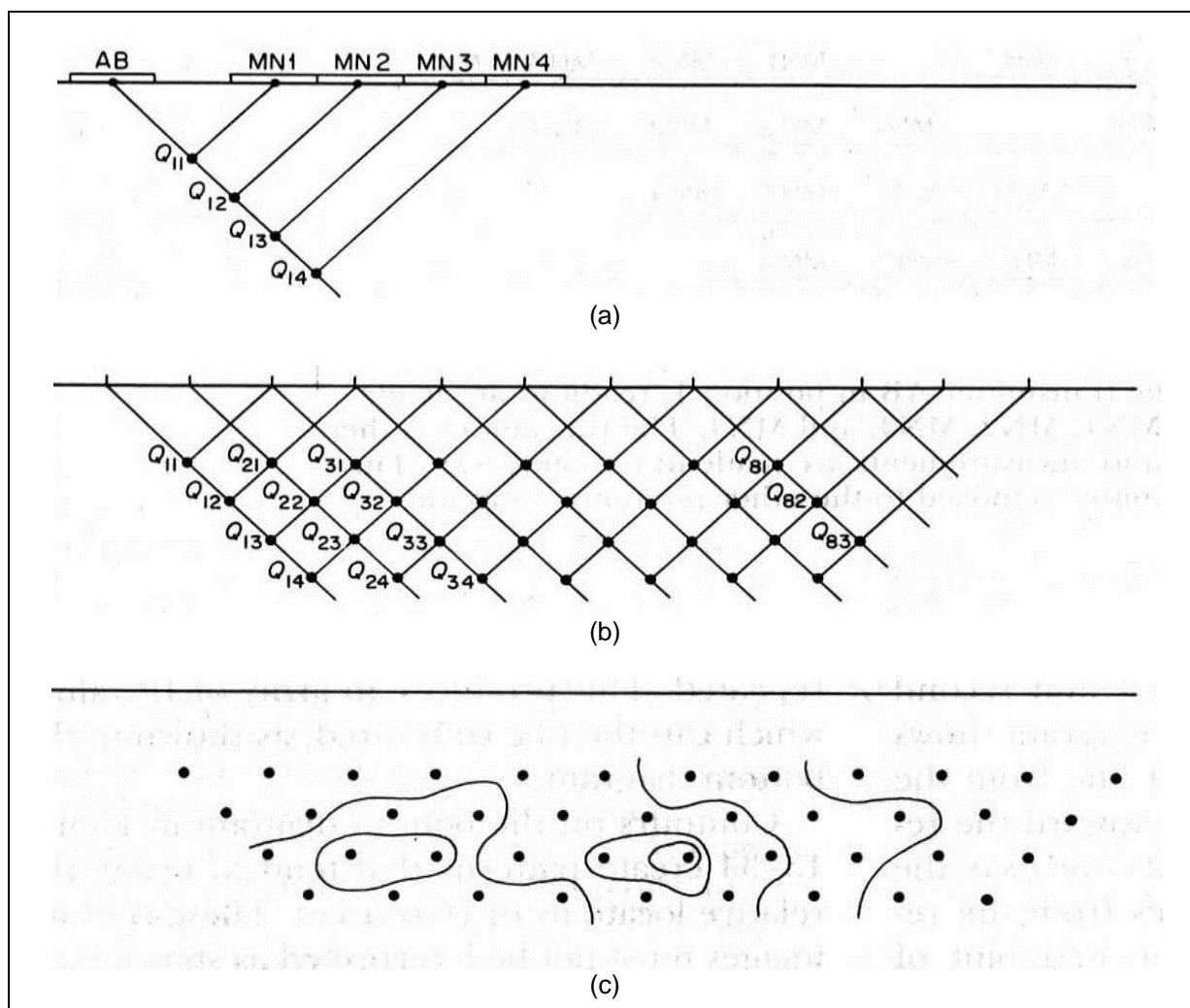


Figura 19 - Representação da pseudo-seção nas medidas de caminhamento elétrico.
 Fonte: adaptado de Burger *et al.* (1992).

A resistividade aparente em um solo uniforme é constante e independente do espaçamento dos eletrodos de superfície. Quando heterogeneidades existem no subsolo, a resistividade aparente varia de acordo com a posição relativa dos eletrodos. Assim os valores de resistividade aparente em uma pseudo-seção distorcem a imagem do modelo real, sendo eles estreitamente dependentes do tipo de configuração e da sensibilidade do conjunto de eletrodos. Assim a fim de se evitar comparações entre resistividades aparentes pseudo-seções só são possíveis para um mesmo conjunto de eletrodos e arranjo. A fim de limitar interpretações erradas devido a representação gráfica, Lile *et al.* (1994) *apud* Samouëlian *et al.* (2005) propuseram mover os pontos de dados de acordo com um conhecimento a priori do solos e determinaram um processo de filtragem.

Assim mesmo levantamentos realizados com diferentes matrizes são capazes de atribuir uma resistividade “real” para cada ponto da área investigada. Pode-se então calcular a resistividade “real” por meio de um programa de inversão (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005). Para se transformar a pseudo-seção de resistividade aparente em uma pseudo-seção de resistividade real é necessário utilização de um método de inversão dos dados. Todos os métodos de inversão tentam, essencialmente, encontrar um modelo cujas respostas estejam em conformidade com os dados medidos.

No método calcado em células, usado pelo programa *Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP*, da *Geosoft/Interpex*, os parâmetros são os valores de resistividade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores da resistividade medida ou aparente. Sabe-se que para um mesmo conjunto de dados, há uma ampla variedade de modelos cujas resistividades calculadas se aproximam, em algum grau, dos valores medidos.

Além de tentar minimizar as diferenças entre os valores calculados e os medidos, o método da inversão também tenta reduzir outros parâmetros que produzem certas características desejadas no modelo resultante. Os refinamentos adicionais também ajudam a estabilizar o processo de inversão. O programa *Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP* usa um método iterativo que, partindo de um modelo inicial, tenta encontrar um modelo aprimorado, cujos valores de resistividade aparente sejam mais próximos aos valores medidos.

Um método iterativo de inversão já bem conhecido, é o método *smoothness-constrain* (deGroot-Hedlin & Constable, 1990 *apud* LPAGA, 2011), expresso pela Equação 3

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u\mathbf{F})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} - u\mathbf{F}\mathbf{r}$$

Equação 3

Onde:

\mathbf{F} = matriz de suavização;

\mathbf{J} = matriz Jacobiana das derivadas parciais;

\mathbf{R} = vetor do logaritmo dos valores de resistividade modelada;

u = fator de suavização;

\mathbf{d} = vetor de perturbação do modelo;

\mathbf{g} = vetor de discrepância.

O vetor de discrepância (\mathbf{g}) contém a diferença entre os valores calculados e medidos de resistividade aparente. A magnitude deste vetor é frequentemente dada como um valor do erro médio quadrático - *rms* (*root-mean-squared*). Este é o parâmetro que o método de inversão tenta reduzir, buscando encontrar um modelo mais ajustado, após cada interação. O vetor de perturbação do modelo (\mathbf{d}) é a variação dos valores de resistividade, calculados usando a equação acima, que normalmente resultam num modelo melhorado. A Equação 3 tenta minimizar uma combinação de dois parâmetros, a diferença entre os valores de resistividade aparentes medidos e calculados, assim como a irregularidade ou rugosidade (ou seja, a recíproca da suavização do modelo) dos valores de resistividade. O fator de suavização controla o peso dado à suavização do modelo no processo de inversão. Quanto maior o fator de suavização mais suavizado é o modelo, porém o erro médio quadrático (*rms*) é provavelmente maior.

O método básico de *smoothness-constrained*, conforme a Equação 3 pode ser modificado de várias formas, as quais fornecem, em alguns casos, resultados satisfatórios. Os elementos da matriz de suavização \mathbf{F} podem ser modificados para que as variações verticais (ou horizontais) dos valores de resistividade modelada

sejam ressaltadas no modelo resultante. Na Equação 3, todos os pontos recebem um mesmo peso. Em alguns casos, especialmente para dados com excesso de ruído, alguns pontos com valores anormalmente altos ou baixos de resistividade aparente podem gerar efeitos indesejáveis na inversão, os quais podem ser reduzidos usando-se uma matriz de ponderação.

A Equação 3 também busca minimizar o quadrado das variações espaciais, ou a rugosidade dos valores de resistividade modelados. Esta abordagem é aceitável se a resistividade verdadeira variar de forma suave e gradativa. Em alguns casos a geologia de um corpo pode ser homogênea, porém seus contatos normalmente são abruptos em relação às rochas encaixantes. Para tais casos, uma fórmula de inversão que minimize as variações absolutas dos valores de resistividade modelada, pode, às vezes, levar a resultados significativamente melhores.

2.4.4. Investigação geofísica em encostas

Modificações do solo devido a deslizamentos possivelmente geram mudanças dos parâmetros geofísicos, que podem ser utilizados para mapear a massa deslizante e monitorar seu movimento. Mesmo se a relação entre parâmetros geofísicos/geológicos continua imposta, os métodos geofísicos aparecem como ferramentas principais no monitoramento e investigação de deslizamentos.

Jongmans e Garambois (2007) revisam aplicações recentes das principais técnicas geofísicas na caracterização de deslizamentos, mostrando seus interesses e seus limites. Métodos de reconhecimento, que incluem principalmente técnicas de sensoriamento remoto, mapeamento geológico e geomorfológico, técnicas geofísicas e geotécnicas, devem ser adaptados às características dos deslizamentos.

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos principais métodos geofísicos utilizados na investigação de deslizamentos, além do parâmetro geofísico medido e do tipo de informação, o contexto geológico, a classificação de Cruden e Varnes, a geomorfologia e a aplicação. Quando disponível, o volume de deslizamento é indicado.

Tabela 3 - Síntese dos principais métodos geofísicos utilizados na investigação de deslizamentos.
Fonte: Jongmans; Garambois (2007).

Método	Parâmetro - informação	Contexto geológico	Tipo de deslizamento	Aplicação
Reflexão sísmica	Vp, Vs, seções verticais 2D	Sedimentos (areia a argila)	Escorregamento de detritos ($\alpha=25^\circ$)	Limites geológicos (80m)
	Vp, Vs, seções verticais 2D	gipsita, xisto e arenito	Escorregamentos ativos complexos ($\alpha=10^\circ$)	Superfície de ruptura (50m) dentro de camada de gipsita
	Vp, Vs, seções verticais 2D	Filito, gnaiss	Deslizamento de rochas ($\alpha=25^\circ$)	Geometria interna (estratificação, falhas)
Refração sísmica	VP, VS	Margas e calcários intemperizados	Escorregamentos ativos complexos ($\alpha=7^\circ$)	Superfície de ruptura (3m)
	VP, VS	Calcários, xisto e detritos	Deslizamentos ativos de rochas-detritos	Relevo do leito rocha (30m) e estrutura interna
	VP, VS	Margas escuras	Corrida de lama ($\alpha=26^\circ$)	Superfície de ruptura basal (9m)
Sondagem elétrica vertical (SEV)	ρ , perfil vertical 1D	Rocha argilosa arenítica	Queda composto solo-rocha ($\alpha=6^\circ$)	Superfície de ruptura (100m)
	ρ , perfil vertical 1D	Margas escuras	Corrida de lama complexa ($\alpha=25^\circ$)	Superfície de ruptura e profundidade leito rochoso (15m)
	ρ , perfil vertical 1D	Margas escuras	Corrida de lama complexa ($\alpha=25^\circ$)	Profundidade do leito rochoso (7,5m)
Tomografia elétrica	ρ , perfil vertical 2D	Calcário a xisto	Deslizamento de rochas ($\alpha=22^\circ$)	Profundidade da superfície de ruptura (10m)
	ρ , perfil vertical 2D	Sedimentos (areia a argila)	Deslizamento de terra-fluxo de detritos ($\alpha=25^\circ$)	Limite geológico e profundidade da superfície de ruptura
	ρ , perfil vertical 2D	Detritos aluviais ou rocha gnaiss	Grandes deslizamentos de rochas ($\alpha=40^\circ$)	geometria 3D da superfície de ruptura e fluxo de água
	ρ , perfil vertical 2D	Argila e areia	Múltiplos deslizamentos de terra ($\alpha=8^\circ$)	Limite geológico e profundidade da superfície de ruptura
	ρ , perfil vertical 2D	Argilas multicoloridas	Deslizamentos-fluxo de terra complexos ($\alpha=9^\circ-10^\circ$)	Profundidade da superfície de ruptura (30m)
	ρ , perfil vertical 2D	Arenito e argila		Profundidade da superfície de ruptura (20m)
	ρ , perfil vertical 2D	Micaxistos	Grandes deslizamentos de rochas	Limites laterais e espessura do deslizamento da rocha (100m)
	ρ , perfil vertical 2D	Areias argilosas sobre rocha cristalina		Profundidade da superfície de ruptura
Potencial espontâneo	V, perfil horiz. 1D e mapa 2D	gipsita, xisto e arenito	Escorregamentos ativos complexos ($\alpha=10^\circ$)	Fluxo ascendente da água no deslizamento
	V, perfil horiz. 1D e mapa 2D	Argilas multicoloridas	Deslizamentos-fluxo de terra complexos ($\alpha=9^\circ-10^\circ$)	Limite do deslizamento e fluxo da água
Eletromagnetismo	α , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Micaxistos	Escorregamentos ativos complexos ($\alpha=10^\circ$)	Limite lateral do deslizamento
	α , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Margas escuras	Grandes deslizamentos de rochas	Limite lateral do deslizamento
	α , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Calcário e xisto, detritos	Corrida de lama complexa ($\alpha=25^\circ$)	Superfície de ruptura e profundidade do leito rochoso (15m)
	α , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Margas escuras	Deslizamentos ativos de rochas-detritos	Localização de áreas saturadas
	α , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Sedimentos (areia a argila)	Corrida de lama complexa ($\alpha=26^\circ$)	Diferenças de umidade
Radar de penetração do solo (GPR)	ε , seções verticais 2D	Sedimentos (areia a argila)	Deslizamento de terra-fluxo de detritos ($\alpha=25^\circ$)	Limites geológicos e profundidade da superfície de ruptura
	ε , seções verticais 2D	Calcário	Deslizamento de rochas	Geometria da massa em movimento (5m)
	ε , seções verticais 2D	Calcário	Deslizamento de rochas	Localização de fraturas (15m)
Gravimétrico	γ , perfil horiz. 1D e mapa 2D	Flysch		Cavidades no leito rochoso

Vp: velocidade da onda sísmica primária (P-wave); Vs: velocidade da onda sísmica secundária (S-wave); ρ : resistividade elétrica; V: potencial elétrico; ε : permissividade elétrica; ρ : densidade; α : declividade média. A profundidade de penetração máxima está indicada entre parênteses.

Segundo McCann e Foster (1990), *apud* Jongmans e Garambois (2007), uma avaliação geotécnica da estabilidade de um deslizamento deve considerar três questões:

- a. a definição da geometria 3D do deslizamento em relação às superfícies de ruptura;
- b. a definição do regime hidrogeológico;
- c. a detecção e caracterização do movimento.

Nota-se o grande alcance das técnicas geofísicas e geológicas na análise de deslizamentos. A prospecção geofísica foi aplicada em vários tipos de deslizamentos para inclinações variando desde poucos graus até a vertical. A profundidade de penetração varia de 3 a 400 metros, e os alvos das pesquisas são principalmente dois: a localização das fronteiras vertical e lateral da massa deslizante ou da superfície de ruptura, e o mapeamento da estrutura interna do deslizamento.

Três situações principais podem ocorrer. No primeiro caso, contrastes geofísicos são derivados de mudanças na litologia, e a superfície de ruptura coincide com a interface ou camada geológica. No segundo caso, contrastes geofísicos também são controlados por variações litológicas, mas a superfície de ruptura secciona a estrutura de uma maneira mais complexa, podendo não ser deduzida a partir de uma imagem geofísica, e dependendo da velocidade do deslizamento, heterogeneidade do material e resolução técnica. Excepcionalmente, a superfície de ruptura é diretamente detectada, principalmente por métodos de propagação. No último caso, o deslizamento se desenvolve em camadas globalmente homogêneas e alteram suas características. O contraste geofísico então aparece entre a massa deslizante e a massa não afetada.

Um segundo objetivo da prospecção geofísica é a detecção de água dentro da massa deslizante, para o qual os métodos elétricos e eletromagnéticos são mais aplicados.

Os deslizamentos constituem estruturas complexas, possuindo uma grande variabilidade das propriedades geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Outros parâmetros como a profundidade de penetração requerida, bem como o volume e morfologia do deslizamento também podem afetar a estratégia de pesquisa, inclusive por razões econômicas.

Recentemente, uma nova área interdisciplinar tem obtido resultados excepcionais na avaliação das propriedades hidrogeológicas a partir de dados geofísicos: a hidrogeofísica. A aplicação desses métodos permite que parâmetros hidrogeológicos de subsuperfície (como porosidade, umidade, condutividade hidráulica) sejam estimados a partir de dados geofísicos de alta resolução.

Imageamento através do método de resistividade constitui uma ferramenta importante em diferentes tipos de investigação, como na avaliação dos riscos hidrogeológicos e geológicos, se mostrando muito útil nas investigações geotécnicas locais.

Wisén *et al.* (2008) analisaram três casos de levantamentos geofísicos utilizando a resistividade elétrica: dois na Suécia e um na Dinamarca. A principal contribuição dos resultados da resistividade foi a possibilidade de interpretar modelos geológicos contínuos, combinando inversão bidimensional suavizada (2D) e inversão bidimensional lateralmente limitada (2D-LCI).

Comparada a outras investigações geológicas locais, as medições de resistividade são rápidas e economicamente eficientes, entretanto, por se tratar de um método indireto, é necessária a sua verificação com as sondagens. A principal contribuição desse método na investigação geotécnica é que a informação se torna disponível de forma contínua em áreas, seções ou volumes, além de ser bastante útil em uma caracterização inicial da extensão de diferentes unidades geológicas e da heterogeneidade da geologia. O modelo contínuo da resistividade fornece a possibilidade de uma interpolação confiável dos parâmetros geotécnicos e, variações unitárias da resistividade revelam informações sobre mudanças na porosidade, teor de argila, umidade e distribuição do tamanho dos grãos.

Nos três casos, os dados de resistividade foram medidos usando as técnicas de sondagem elétrica vertical contínua ou de sondagem elétrica de arranjo contínuo. Foi utilizada uma metodologia aperfeiçoada para interpretação com duas técnicas de inversão diferentes, aumentando assim a interpretabilidade dos dados.

No primeiro caso, os levantamentos geofísicos foram utilizados para o planejamento da construção do chamado *City Tunnel Project* (CTP), com o objetivo de melhorar as conexões entre o sistema ferroviário sueco e uma ponte/túnel ligando a Suécia e a Dinamarca. A construção do CTP consistiu em 17 quilômetros

de ferrovias, e as medições de resistividade foram empregadas onde uma trincheira ferroviária de 2 quilômetros de comprimento e 10 metros de profundidade seria escavada.

O ambiente geológico sedimentar consistia de depósitos Quaternários sobrejacentes a calcários Danianos. Baseado em investigações geotécnicas e geofísicas, um modelo conceitual geológico e hidrogeológico foi criado e foram atribuídos valores da resistividade para as diferentes unidades geológicas. O principal objetivo dessa investigação foi determinar a profundidade do calcário bem como a estratificação e extensão dos diferentes tipos de solos devido à importância da água subterrânea para a análise ambiental, projeto e construção. O imageamento através da resistividade entre unidades geológicas diferentes possui um alto contraste, o que possibilitou um mapeamento contínuo para identificar áreas com riscos geológicos.

O modelo de resistividade 2D suavizado mostrou mudanças laterais de resistividade repentinas, dificultando a detecção de fronteiras nítidas nas interfaces e a determinação da profundidade das camadas. Para o modelo 2D-LCI foram adicionados dados existentes com o objetivo de se resolver ambiguidades e fornecer uma melhor correlação entre as interfaces litológicas, notando-se um pequeno ou nenhum aumento na inadequação dos dados. A combinação desses dois modelos constituiu uma boa base para uma interpretação geológica detalhada, que não seria possível apenas com as sondagens.

O segundo caso foi a utilização da investigação geofísica na após uma ruptura de um talude em maio de 1997, uma área de 200 por 60 m² de depósitos de argila deslizou dentro do *Trosa River Valley*, em Vagnhärads sul de Estocolmo, Suécia, danificando gravemente casas residenciais e infra-estrutura, como mostra a Figura 20. A ruptura do talude foi causada pelo aumento da poro-pressão na argila, sendo que os testes geotécnicos e as sondagens realizadas na área não forneceram uma informação confiável sobre a cota superficial do leito rochoso.



Figura 20 - Fotografia da área residencial de Vagnhärad após o deslizamento.
Fonte: Wisén *et al.* (2008)

A meta principal dos levantamentos geofísicos foi a determinação da geometria do leito rochoso e dos sedimentos ao longo das encostas do vale, pois ela constitui uma propriedade importante nos cálculos de estabilidade. O relatório do projeto *Engineering Geology*, da Universidade de Lund e do Instituto Sueco de Geotecnia, citado por Wisén *et al.* (2008) mostrou que uma combinação entre a resistividade CVES e a refração sísmica constitui uma abordagem bem sucedida. A Figura 21 mostra a posição do rio, estradas, casas remanescentes, e as linhas para a pesquisa geofísica.

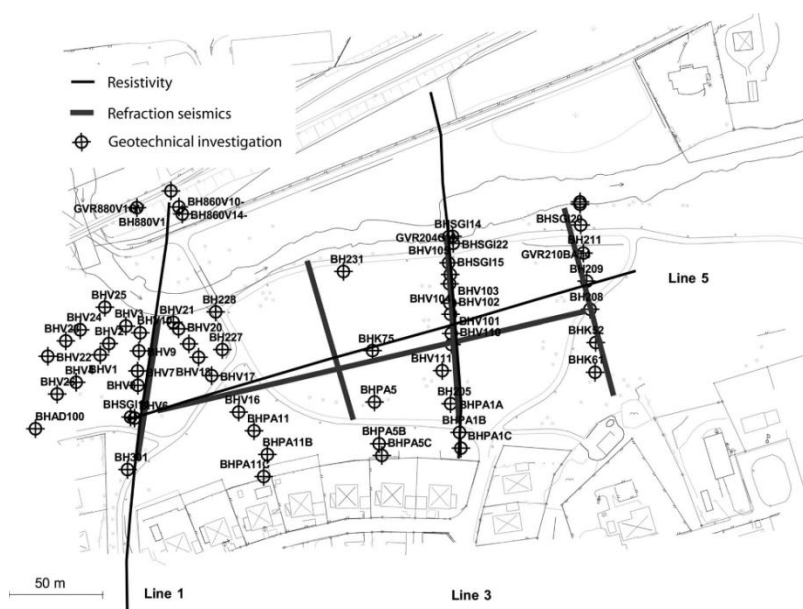


Figura 21 - Mapa detalhado da região estudada.
Fonte: Wisén *et al.* (2008)

Da análise combinada entre dados de resistividade e sísmicos, foi possível quantificar a espessura de uma camada importante da subsuperfície. Esses resultados também poderiam ter sido alcançados através da interpretação

combinada do modelo de inversão 2D suavizada com a refração sísmica. Em ambos os casos, o problema foi resolvido utilizando dados sísmicos. A Figura 22 mostra alguns resultados encontrados utilizando-se somente os dados da resistividade, e outros combinando esses com os dados sísmicos.

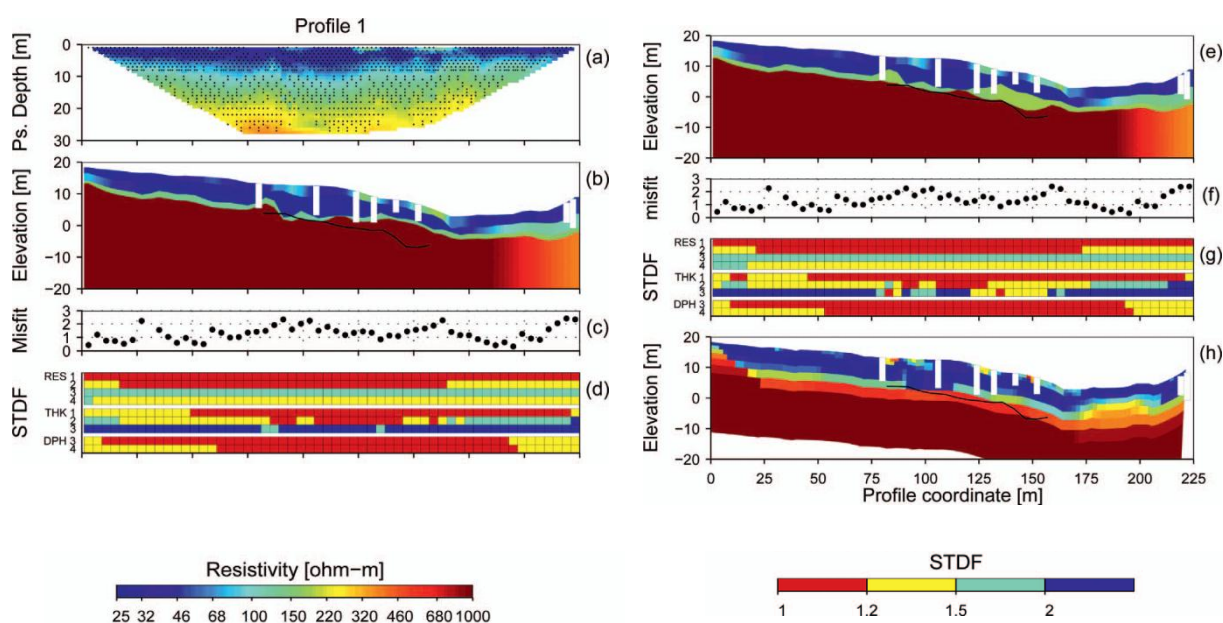


Figura 22 - Perfis de geofísica por eletrorresistividade.

(a) Pseudoseção para a resistividade aparente do Perfil 1; (b) modelos de resistividade 2D-LCI com normalização dos erros residuais 1 correspondendo a um erro de 5% em (c) e fatores de desvio padrão dos parâmetros do modelo em (d); (e) modelo de resistividade 2D-LCI usando interfaces de camadas do modelo de refração sísmica como dados prévios com normalização de erros residuais [1 correspondendo a um erro de 5% em (f) e fatores de desvio padrão dos parâmetros do modelo em (g); (h) modelo de resistividade 2D com inversão suave.

Fonte: Wisén *et al.* (2008).

O último caso é a aplicação do método da Sondagem da Matriz de Atração Elétrica Contínua para estimar os valores absolutos de areia em relação a sedimentos de argila na parte superior, entre 15 e 20 metros, para a construção de uma via expressa de 70 quilômetros de extensão na Dinamarca. A partir desses resultados, pretendeu-se diminuir os custos com a fundação da rodovia e com a remoção de excesso de material, reciclando localmente. Por exemplo, areia e cascalho são ideais para se preencher a fundação, e argilas arenosas, siltes podem ser utilizadas em certas medidas, enquanto materiais bastante argilosos não são usados ou possuem um uso limitado.

Sondagens foram realizadas em intervalos regulares ao longo da via expressa, cobrindo a largura total do local de construção para permitir o mapeamento da variabilidade espacial e complexidade das unidades geológicas. Para comparação entre os perfis obtidos através do PACES, as descrições litológicas foram simplificadas em medidas maiores, distinguindo principalmente sedimentos argilosos e ricos em argila.

Uma pseudoseção dos dados (Figura 23-a) mostra variações laterais relativamente suaves com alguma evidência das estruturas 2D, especialmente na primeira parte do perfil. O modelos 2D-LCI da Figura 23-b identifica as unidades principais como a inversão 2D suavizada da Figura 23-c, mas os limites das camadas são identificados mais precisamente. O nível de água não foi registrado pelas sondagens e não foi possível identificá-lo claramente nas interpretações.

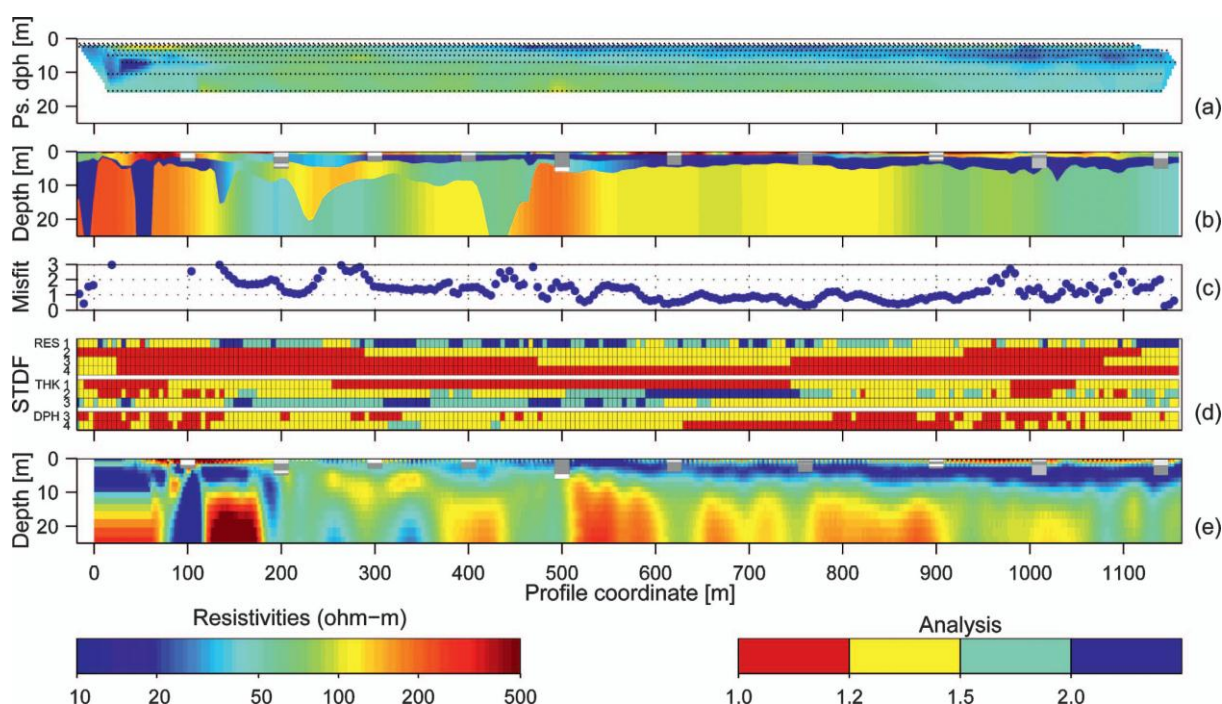


Figura 23 - Perfis de geofísica por eletrorresistividade.

(a) Pseudoseção da resistividade aparente; (b) resultados dos modelos de resistividade 2D-LCI com normalização de erros residual, 1 correspondendo a um erro de 5% em (c), e fatores de desvio padrão dos parâmetros do modelo em (d); (e) modelo de resistividade 2D com inversão suave. Fonte: Wisén *et al.* (2008).

2.5. ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO

Em laboratório, a curva de resistividade elétrica de um solo é obtida através da medição da resistência (em *ohms*) à passagem de uma corrente elétrica conhecida (em *ampéres*), criada a partir da imposição de uma diferença de potencial (em *volts*) entre dois pontos no solo. Para vários teores de umidade são feitas leituras de corrente para incrementos de 10 em 10 volts (BOSZCZOWSKI, 2008).

Para a medida da resistividade, o solo deve ser acondicionado em uma caixa padrão, denominada de “*Soil Box*”. Ela é composta de duas laterais com placas de cobre paralelas e suas demais laterais constituídas de um material isolante, no caso, acrílico (Figura 24).

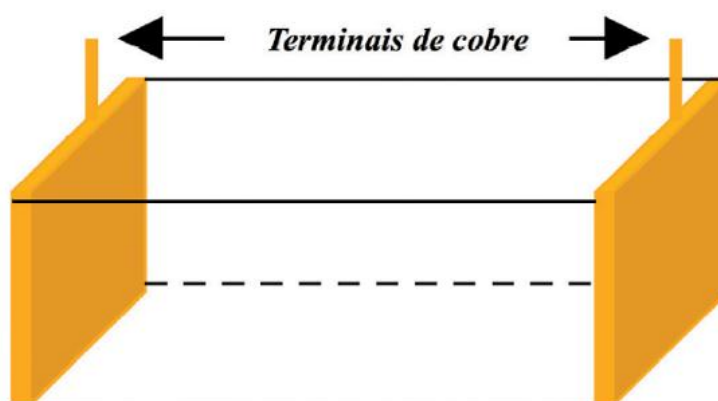


Figura 24 - Caixa padrão para medição de resistividade de solos em laboratório.
Fonte: Silva e Brasil (2010)

O ensaio consiste em medir a resistividade do solo à passagem da corrente elétrica. Para isso, aplica-se no circuito uma corrente, que é transmitida ao solo por uma das placas de cobre. A resistência à passagem de corrente é medida através de um multímetro conectado na placa de cobre.

O cobre é utilizado como essa finalidade devido à sua alta condutividade para não interferir nas medidas. Ao se aplicar corrente e se medir o potencial, está sendo obtida a resistência entre os terminais de cobre. Como as dimensões dessa caixa padrão são tais que seu comprimento é numericamente igual à área

transversal ao fluxo de corrente, o valor da resistência lida é a própria resistência do solo (SILVA; BRASIL, 2010).

Os obstáculos à passagem de corrente elétrica por um meio são denominados resistência e representados por uma propriedade mensurável sendo definida pela Equação 4:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

R = resistência elétrica;

V = diferença de potencial elétrico;

I = corrente elétrica.

Essa definição significa que quando se aplica uma diferença de potencial elétrico (V) em um material, faz-se aparecer nele, uma corrente elétrica (I). A resistência elétrica (R) é definida entre dois pontos de condutor. Ela é uma característica do material como um todo, ou seja, independe do seu comprimento, da sua espessura e do material de que ele é feito.

Para o solo, a resistência pode ser medida através de sua relação com a resistividade, segundo a Equação 5:

$$R_s = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

R_s = resistência do solo (Ohms);

ρ = resistividade do solo (Ohm.cm);

L = comprimento do caminho elétrico (cm);

A = área da seção transversal por onde flui a corrente (cm²).

A grandeza (ρ) é uma propriedade específica dos materiais e depende de características do material. Ou seja, pode-se lidar com um mesmo material com espessuras e tamanhos diferentes e ele apresentará um valor diferente de resistência, porém com a mesma resistividade.

A resistividade é uma das propriedades físicas mais variáveis. Certos minerais como metais nativos e grafite, conduzem eletricidade via a passagem de elétrons. A maior parte dos minerais formados de rochas é, entretanto, isolante, e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela passagem de íons nas águas dos poros. Assim a maior parte das rochas conduz eletricidade por processos eletrolíticos mais que por processos eletrônicos (KEAREY *et al.*, 2009).

A resistividade de um solo está diretamente relacionada à quantidade de compostos iônicos solúveis presentes nele. Em geral, quanto maior for esta quantidade, menor será a resistividade do solo. Além dos compostos iônicos a resistividade de um solo é função também de sua estrutura, composição, grau de saturação e capacidade de retenção de água (BOSZCZOWSKI; SILVA, 2006).

A resistividade elétrica é função das inúmeras propriedades dos solos, incluindo a natureza da composição dos solos (tamanho das partículas, distribuição granulométrica e mineralógica), arranjo dos espaços vazios (porosidade, índice de vazios, conexões e distribuição dos vazios), grau de saturação (umidade), resistividade elétrica do fluido (concentração de sais na água) e temperatura. O ar é um isolante, isto é, infinitamente resistivo; a resistividade da água é função da sua concentração iônica; já nos grãos de solo, a resistividade está correlacionada com a densidade e nas cargas elétricas contidas superficialmente. Esses parâmetros afetam a resistividade elétrica, mas de maneiras diferentes e com intensidades diferentes (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005).

A presença de água é outro fator importante na determinação da resistividade do solo. É a água que dissolve os compostos solúveis presentes no solo. Portanto, se não houver água, não há dissolução, logo não há passagem de corrente (BOSZCZOWSKI; SILVA, 2006). Em geral, quanto maior a presença de íons no fluido, menor é a resistividade, e maior é a condutividade (ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996).

Boszczowski (2008) demonstrou em sua pesquisa a importância de se fixar o índice de vazios do solo para as medições da resistividade. Pois solos com mesmo teor de umidade, sendo moldados na *Soil Box* com índices de vazios diferentes apresentaram valores diferentes de resistividade (Tabela 4).

Tabela 4 - Dados de ensaio de resistividade para teores de umidade constante.
Fonte: Boszczowski (2008).

Solo	Umidade (%)	Resistividade (Ohm.m)	Peso específico (kN/m³)	Peso esp. seco (kN/m³)	Massa espec. real (g/cm³)	e	S (%)
Branco 2.4056.07	13,39	4760	1,056	0,931	2,699	1,899	6,57
	13,39	1989	1,281	1,129	2,699	1,390	10,88
	13,39	997	1,577	1,391	2,699	0,941	19,80
Amarelo 2.4058.07	2,76	26558	1,230	1,197	2,749	1,297	2,55
	2,76	13219	1,398	1,361	2,749	1,020	3,69
	2,76	9666	1,506	1,466	2,749	0,876	4,63
Laranja 2.4057.07	17,06	25172	1,044	0,892	2,741	2,073	7,336
	17,06	5918	1,265	1,080	2,741	1,537	11,991
	17,06	3830	1,414	1,208	2,741	1,270	16,224
Vermelho 2.4059.07	11,89	96339	1,096	0,980	2,807	1,865	6,248
	11,89	20739	1,190	1,064	2,807	1,639	7,717
	11,89	9773	1,309	1,170	2,807	1,399	9,947
Marrom 2.4060.07	7,41	231346	1,110	1,033	2,735	1,646	4,655
	7,41	68667	1,200	1,117	2,735	1,448	5,721
	7,41	49735	1,278	1,190	2,735	1,299	6,789

Solos mais intemperizados sofrem maior influência do índice de vazios que os solos menos intemperizados ou com menor quantidade de argila. Com o aumento do índice de vazios nos solos aumenta a resistividade elétrica, ou seja, aumenta a dificuldade a passagem de corrente elétrica (BOSZCZOWSKI, 2008).

A medida de resistividade do solo é função tanto da resistividade do fluido nos poros quanto das partículas e de seu arranjo. A condutividade elétrica em areias e pedregulhos ocorre quase que exclusivamente pelo fluido contido nos poros, devido ao seu elevado índice de vazio. A areia de quartzo é um material virtualmente não condutor e a resistividade da matriz sólida é considerada infinitamente grande. Em solos argilosos, no entanto, a condutividade elétrica ocorre também através da

superfície carregada eletricamente dos argilo-minerais. Com o aumento da porcentagem de finos nos solos grossos, a resistividade elétrica é afetada de três maneiras. Primeiro, a porosidade irá diminuir, uma vez que os finos irão ocupar o espaço vazio entre grãos de areia, e o decréscimo da porosidade tem o efeito de aumentar a condutividade (CAMPANELLA; WEEMEES, 1990). Segundo, a presença de finos no solo geralmente indica a presença de argilo-minerais, o que deve resultar num decréscimo na resistividade. Terceiro, solos com alto teor de finos também geralmente apresentam uma superfície específica alta, o que aumenta a condutividade superficial.

O solo de baixa resistividade poderá ser aquele que apresenta uma baixa resistividade no ponto de retenção de água e no ponto de saturação de água, juntamente com uma diferença percentual (entre a ρ na retenção e na saturação de água) menor ou igual a 30%.

O solo de média a alta resistividade poderá ser aquele que apresenta uma média a alta resistividade no ponto de retenção de água, juntamente com uma média a alta resistividade no ponto de saturação de água. Neste caso, quando o ponto de retenção de água estiver muito longe do ponto de saturação (desvio de umidade acima de 30% ou desvio de ρ acima de 60%), o valor a ser considerado seria uma resistividade média entre ρ na retenção e ρ mínima, como é o caso da SE Miraselva e da SE Reserva (GAMBOA *et al*, 2005).

A resistividade elétrica também está correlacionada com as propriedades índices. Solos com limite de liquidez ou índice de plasticidade alto apresentam baixa resistividade elétrica.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ENCOSTA ESTUDADA

O oleoduto denominado OLAPA (Oleoduto Araucária-Paranaguá), pertence à malha dutoviária da Transpetro/Petrobras, e está localizado no estado do Paraná. Esse oleoduto distribui os produtos produzidos na Refinaria Presidente Getúlio Vargas - REPAR (Araucária - PR), como gás natural, gasolina e óleos para o Porto de Paranaguá - PR.

A área de estudo localiza-se no km 57+200 m do oleoduto OLAPA, situada próxima à rodovia BR-277, no município de Morretes - PR, entre as coordenadas UTM 716000E – 716750E e 7171250N – 7171550N (Figura 25).



Figura 25 - Vista aérea da encosta OLAPA.

A encosta, com altura aproximada de 150 m e comprimento estimado em 650 m, pertence à cadeia de montanhas da Serra do Mar. A região apresenta grande parte da vegetação preservada, com uso agrícola apenas para atividades de subsistência.

3.1. HISTÓRICO DE MOVIMENTAÇÕES

A encosta em estudo apresenta um interessante histórico de movimentações, o que levaram vários pesquisadores a realizar estudos no local. Alguns deles serão apresentados na sequência, juntamente com o histórico das movimentações, baseado em dados de relatórios técnicos, dissertação, e de informações fornecidas pelo CENPES à equipe de pesquisadores da UFPR.

Em março de 1999, a equipe da Petrobras constatou a existência de trincas e de erosão superficial próximo ao km 57 do duto OLAPA, contratando a empresa Geoprojetos para a realização de uma avaliação do local. A empresa SF Geodésica e Topografia Ltda ficou responsável pelo serviço de levantamento planialtimétrico com cadastramento das trincas.

Segundo Geoprojetos (2001) *apud* Suzuki (2004), a drenagem superficial existente era composta de valas abertas no terreno, sendo que uma parte das águas coletadas estava direcionada para uma voçoroca, contribuindo para a continuidade do processo erosivo. Em maio de 1999, a Geoprojeotos ampliou o projeto de drenagem e redirecionou o trecho que estava indo para a voçoroca para o leste, onde já existia uma linha de drenagem para um córrego. Além disso, foram construídas canaletas em concreto de seção trapezoidal e nas áreas de maior declividade foram projetadas canaletas em degraus, para melhorar a drenagem superficial.

No mesmo ano, foi implantado um programa de investigações geotécnicas e de instrumentação. Os furos das sondagens, realizados entre abril e maio de 2000, foram utilizados para a instalação de inclinômetros e piezômetros.

A primeira fase de instalação dos instrumentos aconteceu entre maio e junho de 2000, onde foram colocados na encosta 1 pluviômetro, 11 piezômetros e 6 inclinômetros. Em julho de 2000 foi realizada a leitura inicial dos inclinômetros pela Geoprojetos, sendo a leitura dos piezômetros responsabilidade da Petrobras.

Em outubro do mesmo ano, verificou-se que a encosta encontrava-se em movimento que, em função das velocidades constatadas, foi caracterizado como rastejo, com camada de colúvio movimentando-se translacionalmente sobre o solo

residual. O movimento era intermitente, acelerando no verão e diminuindo no inverno devido ao período de estiagem (LACERDA, 2006).

Em fevereiro de 2001, as obras para estabilização da encosta não estavam concluídas (faltava a instalação de drenos horizontais profundos - DHP's), quando um período de chuvas intensas acelerou o movimento da encosta, provocando assim um acréscimo de tensões no duto, que acarretou a sua ruptura em 16/02/2001.

De acordo com o parecer técnico emitido pela ERM Brasil Sul Ltda. (CENPES, 2001), a comparação dos dados de pluviometria na estação Morretes do mês de fevereiro de 2001 com a série histórica de dez anos observada para o mesmo mês, demonstra que a intensidade ocorrida de precipitação (484,4 mm) foi bastante superior ao apresentado anteriormente. Somente na primeira quinzena do mês a precipitação registrada foi de 317,31 mm. Segundo o parecer técnico, a intensidade excepcional de chuva contribuiu para a instabilização do talude.

Na Figura 26, está indicada a área instável em forma “de língua” com linhas tracejadas. No detalhe da figura pode-se observar a posição predominantemente oblíqua da faixa do duto em relação à “língua”.



Figura 26 - Vista aérea do local do acidente indicado pela linha tracejada.
Fonte: Lacerda (2006).

O movimento promoveu o arraste do duto, acumulando tensões de tração junto ao trecho de engastamento. Essas tensões, acumuladas ao longo de vários anos após a instalação do duto, desencadearam a sua ruptura (CENPES, 2001).

Cerca de 50 mil litros de óleo diesel vazaram na Serra do Mar, na região de Morretes - PR, atingindo quatro rios. A vista geral da encosta pode ser vista na Figura 27, onde se nota que não houve escorregamento de terra, mas apenas rastejo.



Figura 27 - Vista geral da encosta.
Fonte: Suzuki (2004).

Segundo CENPES (2001), o afastamento de 32 cm (Figura 28) encontrado no dia do acidente, aumentou após o dia 17/02/2000. A velocidade de afastamento médio entre os dias 17/02/2000 e 22/02/2000 foi de 20 mm/dia. Este fato demonstra a continuidade do movimento.



Figura 28 - Ruptura do duto.
Fonte: Suzuki (2004).

No mesmo mês, durante inspeção do local após a ruptura do duto, foram identificadas novas trincas, além das já cadastradas, indicando a evolução do movimento da encosta.

Foi então elaborado um sistema de drenagem composto por drenos sub-horizontais profundos, iniciando-se sua instalação em março de 2001, constituída por 8 conjuntos, totalizando 56 drenos. Em função das vazões dos drenos e das leituras dos piezômetros, o projeto foi aperfeiçoado com a instalação de novos drenos para rebaixar o lençol freático (LACERDA, 2006). Durante a implantação do projeto de estabilização, foi instalada a segunda fase da instrumentação, composta por 8 inclinômetros e 7 piezômetros adicionais.

A leitura dos inclinômetros mostrou que o rebaixamento do lençol d'água promovido pelos DHP's praticamente parou o movimento, como se pode observar no gráfico da Figura 29.

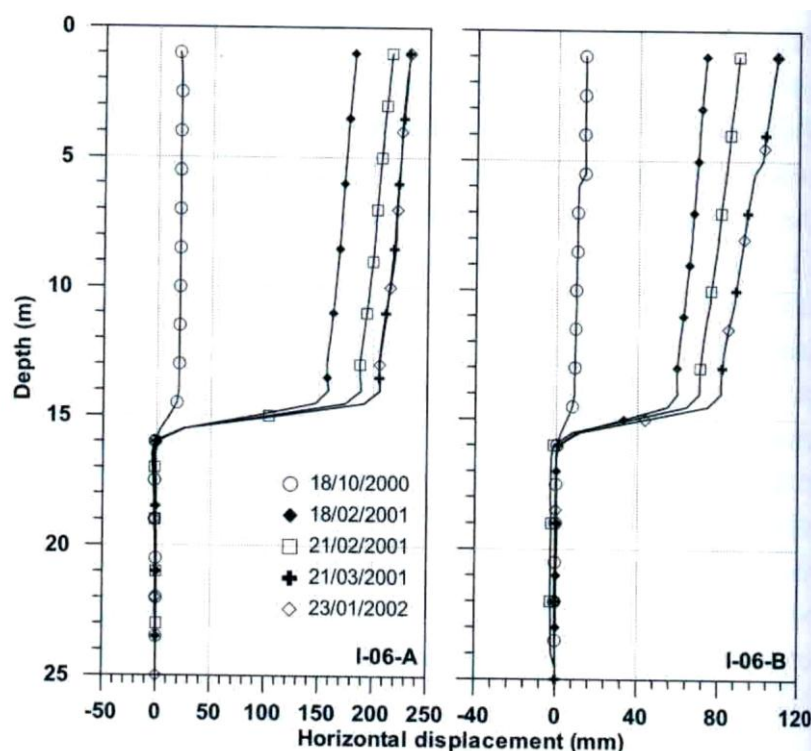


Figura 29 - Movimentação do Inclinômetro I-06, próximo ao local rompido.

Fonte: Suzuki (2005) *apud* Lacerda (2006).

A Figura 30 é apresentada a topografia da encosta, com as curvas de nível representadas a cada 5 metros, além das trincas observadas em março de 1999 e a o posicionamento do duto. A área instável em formato de “língua” foi delimitada com uma linha tracejada.

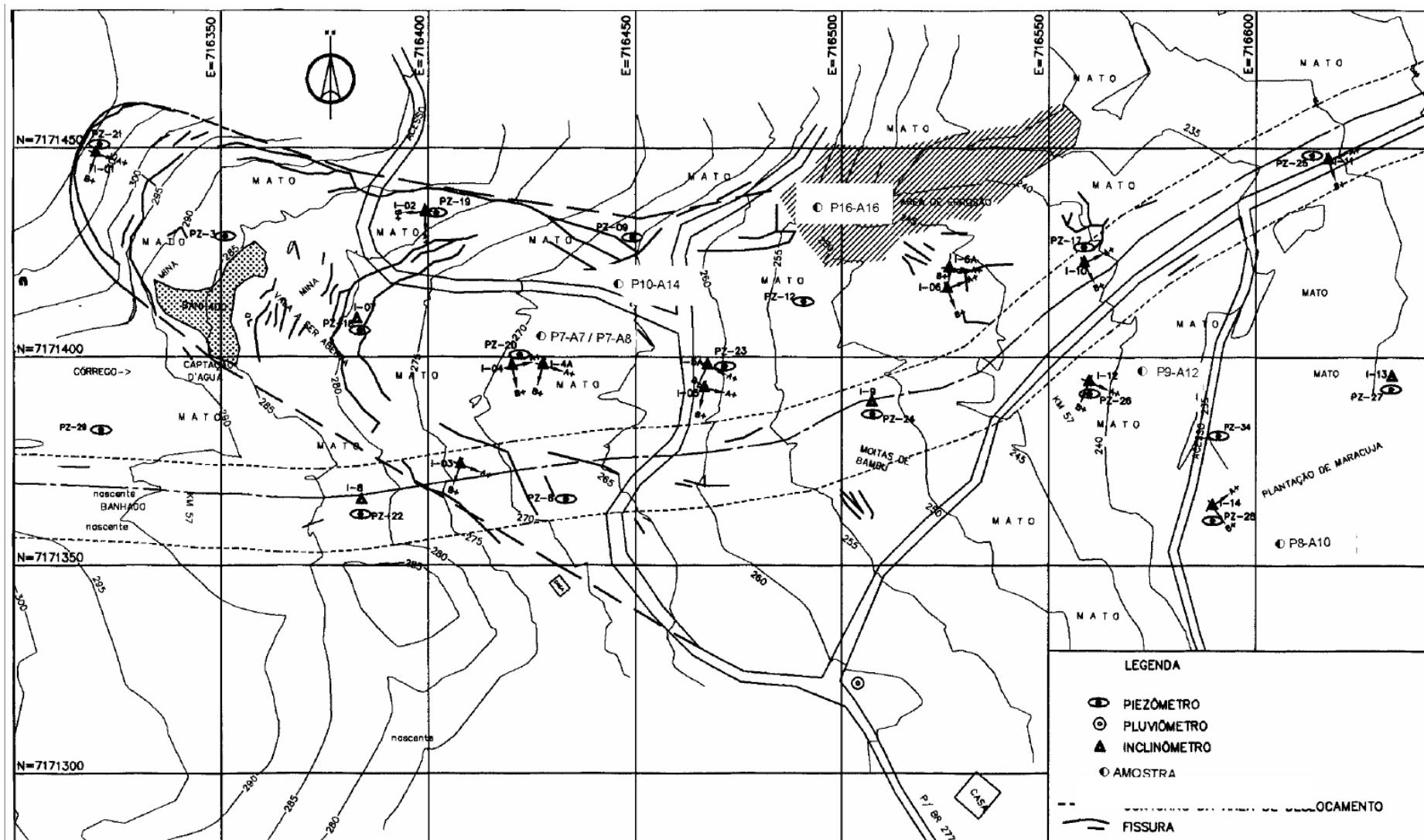


Figura 30 - Planta topográfica da encosta OLAPA – instrumentação.
 Fonte: Geoprojetos (2000) *apud* Suzuki (2004).

3.2. CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO - SONDAGENS

De acordo com as sondagens realizadas em maio de 2000, identificou-se a existência de um depósito de solo coluvionar, distribuído em camadas de solo classificados como argilo-siltoso e silto-argiloso, com presença de matacões, característico de um depósito de tálus, preenchendo um talvegue controlado por falhamentos do maciço rochoso (CENPES, 2001).

Solos coluvionares estão sujeitos ao fenômeno do rastejamento. Este tipo de movimento pode ocorrer por centenas de anos e sua velocidade é sazonal e controlada pelo nível freático.

O rastejamento em taludes desencadeia a formação de trincas gravitacionais que podem tangenciar um plano preferencial profundo, sob o qual toda a massa de solo se desloca.

A Figura 31, ilustra um modelo geotécnico do processo de rastejamento com formação de trincas e rejeitos de falhas gravitacionais.

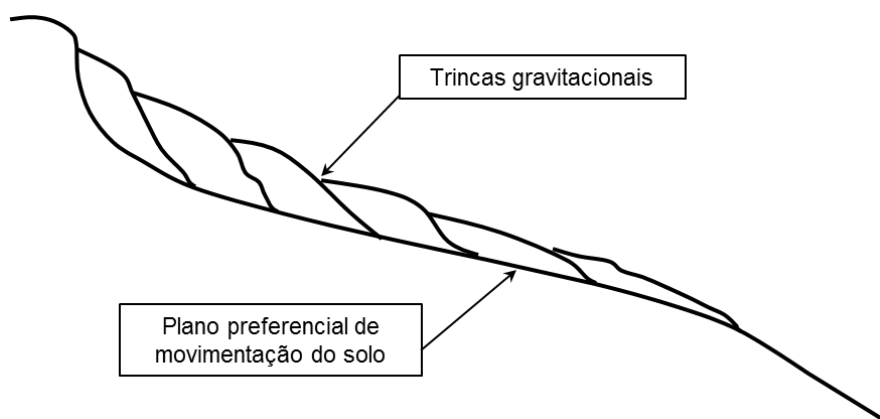


Figura 31 - Modelo geotécnico do rastejo com falhas gravitacionais.
Fonte: CENPES (2001).

O valor da inclinação média da encosta é 13° , entretanto pode ser maior em alguns trechos. Suzuki (2004) encontrou o ângulo de atrito residual deve estar entre 21° e 24° , o peso específico médio medido nos corpos de prova moldados em laboratório foi de 13kN/m^3 . Porém, devido à heterogeneidade do sítio, estes números tendem a ser variáveis.

De acordo com o relatório CENPES (2001), no topo do talude superior do depósito verifica-se a presença de um rejeito de falha gravitacional com cerca de 1,70m induzido pelo movimento do depósito. Foram instalados instrumentos para a avaliação deste ponto do maciço. Na Figura 32, de abril de 2011 é possível observar essas trincas gravitacionais mais acentuadas, inclusive com a proteção dos instrumentos abatidos devido ao processo progressivo do rastejo da região.



Figura 32 - Falha gravitacional no topo do talude.

As sondagens disponibilizadas pela empresa totalizam 16 furos, foram executadas pela Tecnosolo e os resultados foram apresentados em relatórios individuais. Para fins de uma avaliação preliminar, a definição da profundidade do contato solo-rocha foi feita com base em dados de sondagens mistas, na mudança do avanço por percussão (SPT) para rotativa (Tabela 5).

Tabela 5 - Resumo dos dados de sondagem da encosta OLAPA.

IDENTIFICAÇÃO	DATA DO LAUDO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	COTA	TIPO	PROFUND. (m)	PROFUNDIDADE NÍVEL D'ÁGUA (m)	CONTATO SOLO-ROCHA
SDN-4350.11-057.200-001	15/05/2000	7171448,698	716319,814	309,185	mista	23,03	não encontrado	16,23
SDN-4350.11-057.200-002	18/04/2000	7171428,894	716350,984	285,751	mista	14,00	0,050	13,45
SDN-4350.11-057.200-003	26/04/2000	7171434,676	716399,229	280,417	mista	23,00	não encontrado	6,00
SDN-4350.11-057.200-004	08/04/2000	7171374,130	716407,821	273,473	mista	30,82	não encontrado	9,02
SDN-4350.11-057.200-005	15/04/2000	7171397,718	716420,268	269,615	mista	21,12	não encontrado	14,42
SDN-4350.11-057.200-006	15/04/2000	7171365,972	716433,190	267,380	mista	10,00	não encontrado	4,75
SDN-4350.11-057.200-007	18/04/2000	7171392,499	716466,685	262,345	mista	26,00	não encontrado	não definido
SDN-4350.11-057.200-008	30/04/2000	7171413,285	716490,656	252,183	mista	15,50	2,600	não definido
SDN-4350.11-057.200-009	30/04/2000	7171416,281	716525,418	247,459	mista	24,50	não encontrado	não definido
SDN-4350.11-057.200-010	30/04/2000	7171426,332	716558,491	240,411	mista	23,50	não encontrado	não definido
SDN-4350.11-057.200-011	15/04/2000	7171404,694	716382,328	**	percussão	6,37	0,600	não definido
SDN-4350.11-057.200-012	18/04/2000	7171406,394	716383,497	278,400	mista	14,30	2,400	12,60
SDN-4350.11-057.200-013	30/04/2000	7171434,524	716401,952	280,256	mista	15,60	não encontrado	não definido
SDN-4350.11-057.200-014	08/04/2000	7171400,632	716422,154	269,480	mista	26,00	não encontrado	14,50
SDN-4350.11-057.200-015	24/05/2000	7171451,840	716320,768	309,183	mista	22,00	não encontrado	20,00
SDN-4350.11-057.200-016	25/05/2000	7171428,635	716449,237	266,063	mista	26,15	17,230	não definido

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de campo e laboratório a fim de se conhecer melhor as propriedades geotécnicas da região. Para isso realizou-se uma campanha de ensaios geofísicos, coleta de amostras, ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento, além de ensaios de resistividade. Nesse item serão descritas as metodologias empregadas nos ensaios a fim de prover a sua repetitividade.

4.1. GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE

Entre os métodos geofísicos disponíveis na região optou-se pela realização do método de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, pois esse método possibilita uma visualização bidimensional do terreno e os dados podem ser tratados para possibilitar visualizações tridimensionais. Além de seu custo ser razoável e por não demandar de fontes explosivas, como no ensaio sísmico, que poderiam colocar em risco a integridade do duto.

Para a realização dos ensaios de geofísica de eletorresistividade foram definidas as linhas dos caminhamentos, em planta, por regiões próximas de instrumentações geotécnicas, pois assim têm-se dados de sondagem para melhor interpretação dos resultados da geofísica. A localização dos ensaios geofísicos é representada na Figura 33.

Antes da entrada na área, foi necessária a emissão de uma liberação chamada “Área Liberada”, junto ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP). A liberação se fez necessária, pois a área de estudo está situada na Mata Atlântica e, assim sendo, área de preservação permanente. A liberação nos possibilitava a entrada na área e a abertura de picadas, com corte de vegetação rasteira.

Em campo, definiu-se a viabilidade da implantação das linhas dos caminhamentos, onde foram necessários relocar algumas linhas evitando áreas de declives acentuados o que dificultava o acesso, áreas de desmoronamento e residências. Após iniciou-se a abertura de picadas em torno de 1 metro de largura e

em seguida a locação dos piquetes de 20 em 20 metros sendo suas coordenadas definidas com uma estação total posteriormente.

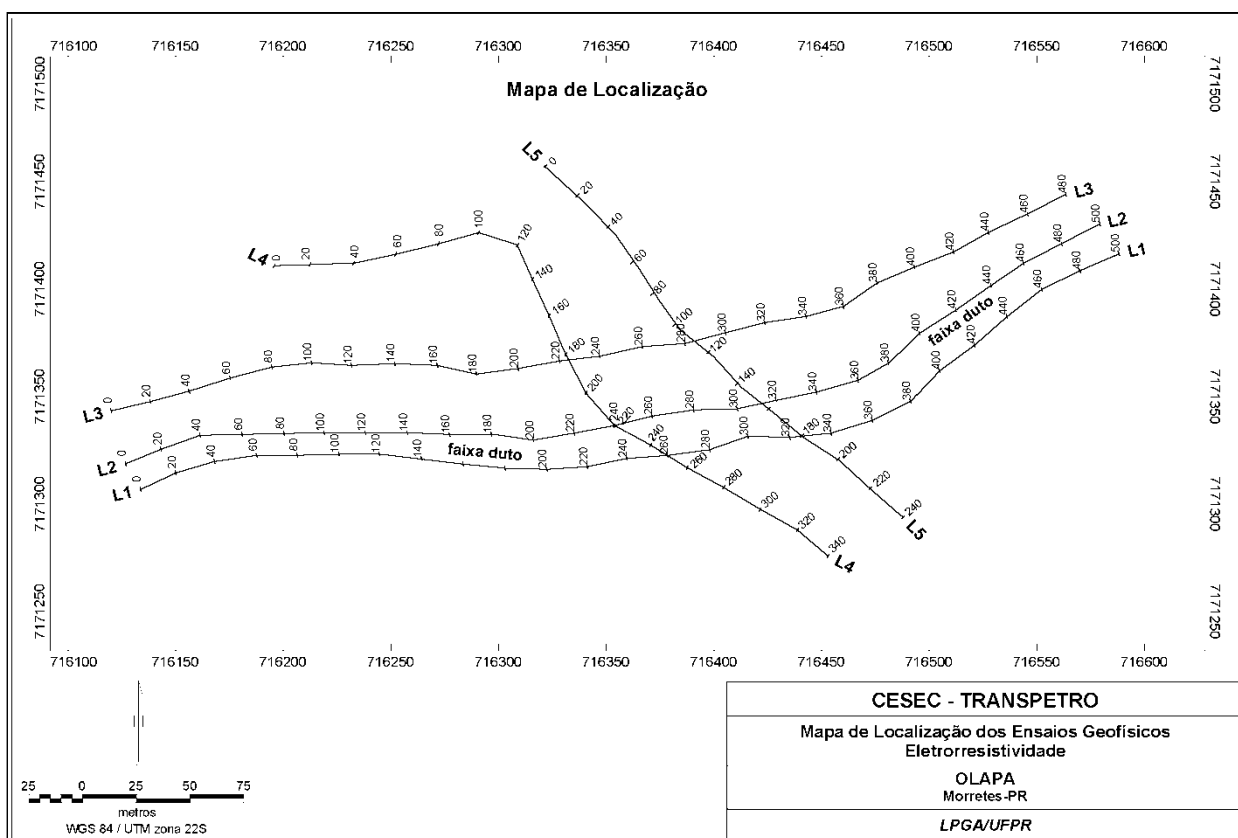


Figura 33 - Mapa de Localização dos ensaios geofísicos.
Fonte: LPAGA (2011)

Antes do início dos ensaios da geofísica foi necessário agendar uma data juntamente com a equipe da Petrobras para programar o desligamento da proteção catódica do duto. Essa proteção é a passagem de corrente elétrica pelo duto, sendo um sistema de proteção contra corrosão, porém ela tende a influenciar a leitura do ensaio da geofísica, gerando um ponto de maior resistividade. Foram desligadas essa proteção para as duas linhas ao qual o caminhamento passava sobre o duto, as Linhas 4 e 5.

O levantamento de eletrorresistividade (tomografia elétrica 2D) foi executado juntamente com o Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR entre 26 e 28/04/2011, envolvendo cinco linhas de caminhamento elétrico e totalizando 2.060 m de perfis adquiridos com arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=20$ m).

Os dados de tomografia elétrica 2D foram adquiridos por um eletrorresistivímetro composto por dois módulos, um transmissor de corrente (Figura 34-a) e um receptor de voltagem (Figura 34-b), ambos da marca AC ABEM. O transmissor é conectado aos eletrodos de corrente A e B, enquanto o receptor é acoplado aos de potencial M e N. Os dados de produção envolveram 2.060 m.



(a) (b)
Figura 34 - Equipamento utilizado nos ensaios de tomografia elétrica 2D.

O procedimento do levantamento geofísico foi ilustrado na Figura 35 como:

- (a) aberturas das picadas em torno de 1 metro de largura;
- (b) locação dos piquetes a cada 20 metros;
- (c) passagem da fiação elétrica dos eletrodos até o receptor;
- (d) inserção no solo dos eletrodos e conexão com a fiação elétrica;
- (e) posicionar os eletrodos de corrente (AB) no início da linha e para melhorar o contato do solo-eletrodo, despeja-se no solo uma solução de cloreto de sódio;
- (f) com o equipamento de transmissão injeta-se corrente no solo através do eletrodo de corrente;
- (g) as leituras foram lidas por um receptor de corrente, através de pares sucessivos de eletrodos de potencial (MN) espaçados a cada 20 metros;
- (h) o transmissor (AB) é deslocado para a próxima estação, na mesma linha, e o procedimento então é repetido até o final da linha do caminhamento.



Figura 35 - Procedimento do levantamento geofísica de eletroresistividade.

4.2. COLETA DE AMOSTRAS

Para a realização dos ensaios geotécnicos em laboratório foi necessária a coleta das amostras no sítio em estudo. Assim a definição dos locais para a coleta foi feita com auxílio dos ensaios geofísicos de resistividade, juntamente com os dados de sondagem SPT pré-existent, adotados os seguintes critérios:

- pontos que não coincidisse com os escolhidos por SUZUKI (2004), possibilitando a comparação de resultados e a melhor interpretação da estratigrafia local (Figura 36 e Figura 37);
- amostras com diferentes resistividades nos perfis da geofísica;
- pontos onde houvesse maiores incertezas, locais esses, onde os resultados de SPT e geofísica mostrassem informações contrastantes;
- locais próximos aos caminhamentos da geofísica (Figura 38);
- pontos que estivessem dentro e fora da zona de deslizamento;
- acessibilidade da equipe e dos equipamentos;
- evitada de derrubada de árvores e vegetação;
- evitada a áreas onde se possa interferir nos tubos de piezômetros, inclinômetros ou drenos sub-horizontais.

Assim, os pontos escolhidos para a coleta de amostras são os mostrados nas Figura 36 e Figura 37, segundo as respectivas legendas. Nestas figuras, pode-se observar os pontos de amostragem tanto em relação às curvas de nível, quanto aos caminhamentos, sondagens e dutos.

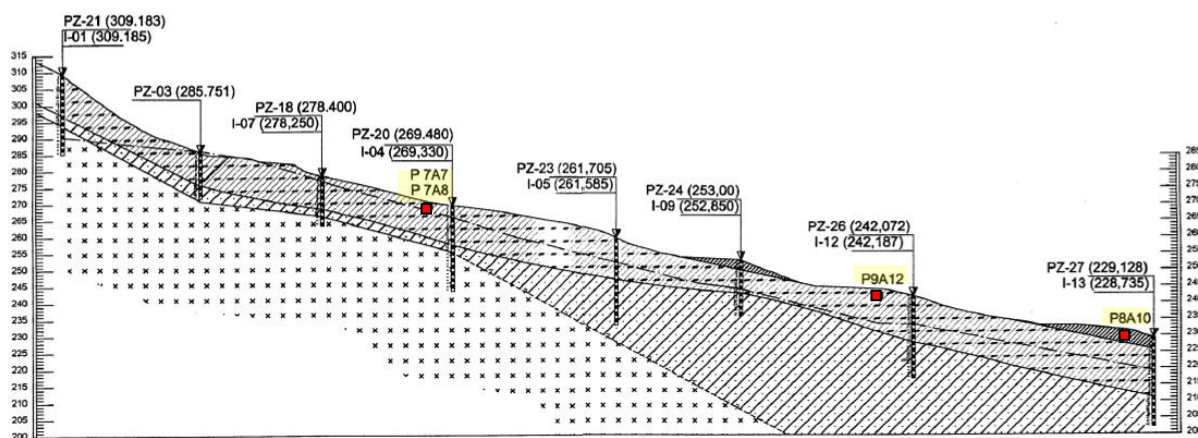


Figura 36 - Seção transversal da encosta OLAPA (falta legenda dos solos).
Fonte: Suzuki (2004).

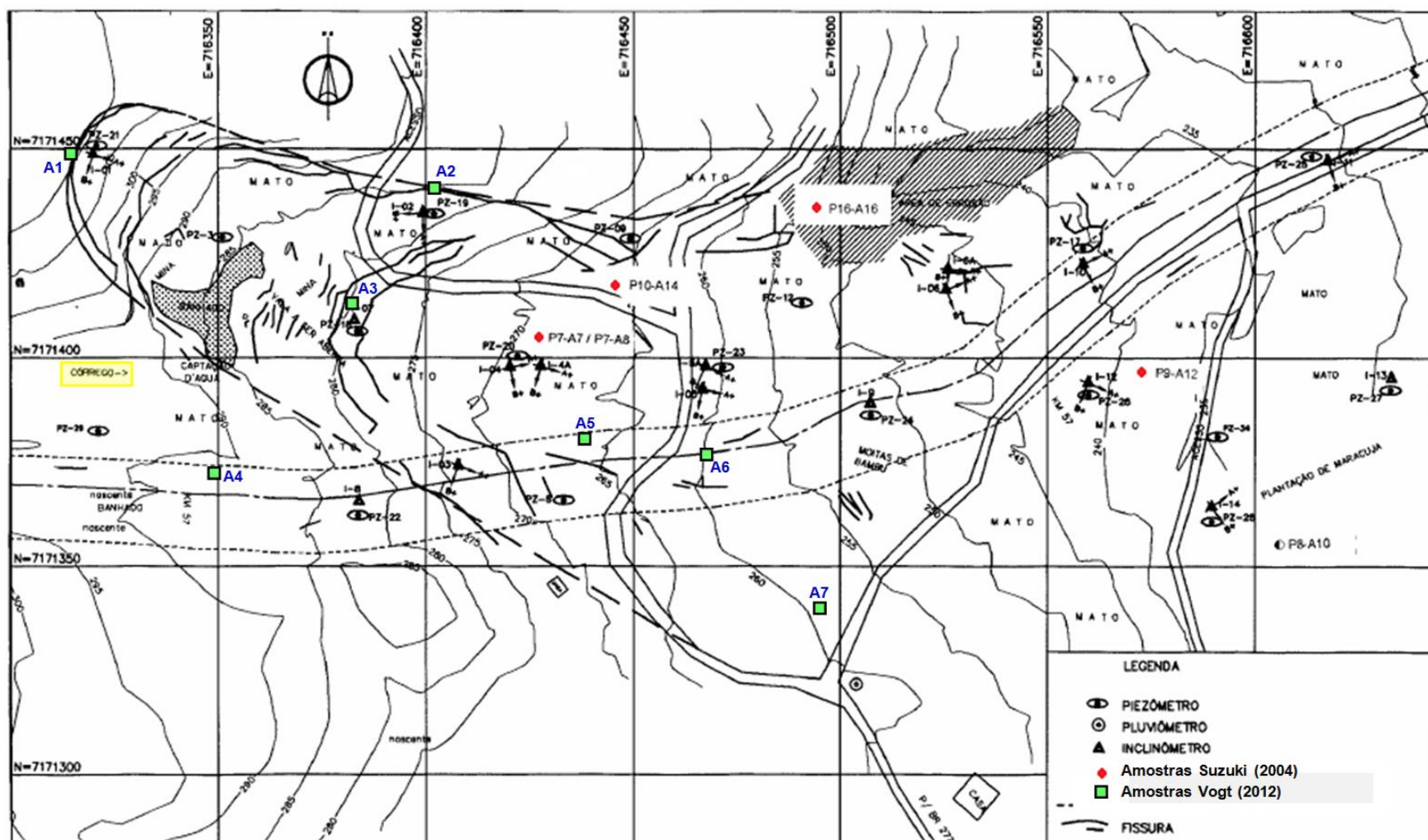


Figura 37 - Pontos de amostragem.
Fonte: adaptado Geoprojetos (2000) *apud* Suzuki (2004).

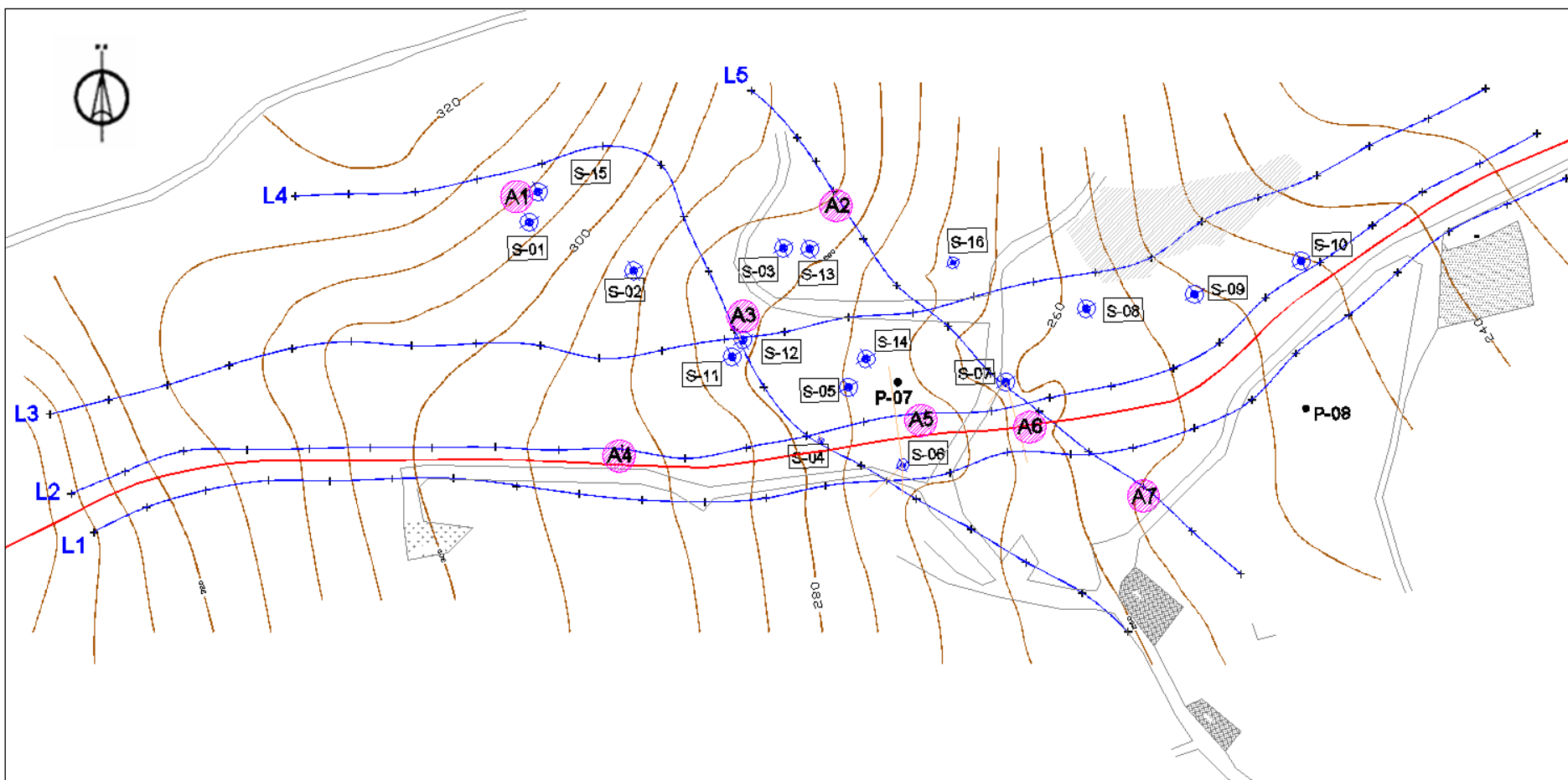


Figura 38 - Locais das coletas com os caminhamentos da geofísica (OLAPA).

Optou-se por coletar as amostras indeformadas de solo, em bloco, pois se desejava analisar os parâmetros quanto à resistência ao cisalhamento e a permeabilidade, na condição verificada *in situ*, sendo os blocos indeformados o método de coleta mais adotado para a preservação das características próximas a de campo. Para a realização dos ensaios de caracterização, as amostras de solo deformadas foram coletadas no mesmo ponto dos blocos, usando-se sacos de rafia para o transporte das mesmas.

A metodologia adotada para a coleta de amostras seguiu os procedimentos descritos na NBR 9604/86 – Abertura de poços de trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas, além das regras internas de segurança da Petrobras. Os principais pontos dessa metodologia são:

- moldagem de blocos indeformados com formato aproximadamente cúbico, em torno de 25 cm de aresta;
- a partir de 10 cm acima da profundidade prevista para coleta, a escavação deve ser executada com os mesmos equipamentos a serem utilizados na talhagem do bloco;
- atingida a cota de topo do bloco, deve-se iniciar a talhagem lateral, nas dimensões previstas, até 10 cm abaixo de sua base, sem seccioná-lo (Figura 39a);
- envolver as faces expostas do bloco com fralda, a fim de proteger a face do bloco, e aplica-se uma camada de parafina líquida antes do seccionamento de base (Figura 39b);
- gira-se o bloco sobre a tampa superior da caixa identificada como topo e realiza-se a talhagem da base do bloco para posterior finalização com fralda e parafina;
- a amostra é encaixada em uma caixa de madeira com o fundo aberto, esta caixa contém dimensões internas 6 cm maior que o bloco (Figura 39c);
- realiza-se o preenchimento das laterais do bloco com serragem úmida para evitar que a amostra se movimente no interior da caixa. No fundo do bloco deve-se aplicar uma camada de 3 cm de serragem (Figura 39d);

- fecha-se o fundo da caixa de madeira com a sua tampa e então gira-se a caixa para a posição vertical segurando-se a tampa de topo, que ainda não está fixada;
- realiza-se novamente o preenchimento das laterais da caixa com serragem úmida e o topo do bloco. Deve-se colocar a ficha de identificação do bloco, local, identificação do poço, nome da amostra, data da coleta além dos dados que forem necessários para a identificação da amostra;
- após o fechamento da caixa de madeira deve-se identificar a parte superior da caixa com as palavras “topo”, pois deve ser transportado para a câmara úmida no laboratório com o topo voltado para cima, no menor intervalo de tempo, evitando-se impactos e vibrações excessivas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 39 - Procedimento para coleta de amostras indeformadas.

A campanha de coleta de amostras foi realizada de 18 de setembro a 22 de outubro de 2011. Foram coletadas amostras superficiais, sendo 6 blocos de solo indeformados de 25x25 cm e 7 amostras deformadas, em torno de 40 kg cada. Não foram retiradas amostras de solo extremamente superficiais por elas conterem material orgânico e presença de raízes. As amostras foram nomeadas A1 até A7, conforme apresentados na Tabela 6 apresenta as características gerais de cada amostra, e as amostras coletadas estão ilustradas na Figura 40.

Tabela 6 - Registro das amostras

Amostra	Data da Coleta	Profundidade (m)	Observação de Campo	Característica do Material
A1	18/09/11	0,50-0,80	Coleta próximo aos instrumentos INC-01 / PZM-16, a montante da área de ruptura.	Argila siltosa
A2	22/10/11	0,60-0,90	Coleta realizada na Linha 5, continuando a leste da entrada do instrumento PZM-013.	Argila siltosa
A3	18/09/11	0,30-0,60	Coleta realizada na Linha 2, a nordeste dos instrumentos INC-07 / PZM-11/12	Argila arenosa
A4	17/09/11	0,60-0,90	Coleta realizada na Linha 2, na área de faixa do Olapa	Areia siltosa
A5	17/09/11	0,40-0,70	Coleta realizada entre na Linha 2, na área de faixa do Olapa, próximo do instrumento INC-03	Argila siltosa
A6	22/10/11	0,40-0,70	Coleta realizada entre as Linhas 1 e 2, no centro da área de faixa a jusante da estrada de acesso principal (apenas amostra deformada).	Areia siltosa
A7	22/10/11	0,40-0,70	Coleta realizada na Linha 5, entre a faixa do Olapa e a estrada secundária de acesso aos moradores.	Areia siltosa

No local escolhido para a coleta da amostra A6, foi observado material arenoso com presença de pedregulhos e com baixa coesão, o que impossibilitou a coleta do bloco indeformado. Desta forma, optou-se por coletar apenas amostra deformada desse local e relocou-se esse ponto de coleta para uma área próxima sendo renomeada de A7, onde se encontrou material arenoso com pedregulho porém de maior coesão.

Após a coleta, as amostras indeformadas foram acondicionadas em câmara úmida do Laboratório de Solos do LAME/LACTEC e as amostras deformadas foram para o Laboratório do LAGEMA/UFPR.



A1



A2



A3



A4



A5



A6



A7

Figura 40 - Coleta das amostras indeformadas.

4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização geotécnica foram conduzidos no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME, situado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. Este laboratório pertence ao Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento – LACTEC. O laboratório possui ampla maioria dos equipamentos e instrumentos utilizados com certificação de calibração e as instalações do laboratório possuem sistema de controle de temperatura e umidade.

Os ensaios de caracterização foram realizados nas amostras deformadas representativas coletadas juntamente com os blocos indeformados. Os ensaios de caracterização seguiram os procedimentos descritos pelas normas brasileiras a seguir relacionadas:

- umidade natural foi determinada segundo o procedimento descrito no anexo a norma NBR 7182 (ABNT, 1986);
- o ensaio de massa específica dos grãos foi determinado utilizando a norma NBR 65008 (ABNT, 1984a);
- a análise granulométrica com sedimentação foi realizada segundo os procedimentos da norma NBR 7181 (ABNT, 1984b);
- o limite de liquidez foi determinado segundo a norma NBR 6459 (ABNT, 1984c);
- o limite de plasticidade foi determinado segundo a norma NBR 7180 (ABNT, 1984d);
- o ensaio de permeabilidade foi realizado a carga constante seguindo os procedimentos descritos na NBR 13292 (ABNT, 1995).

Todos os ensaios de caracterização foram realizados com secagem prévia ao ar das amostras de solo.

4.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio destina-se a avaliar a resistência ao cisalhamento de pico em termos de tensões totais utilizando, por exemplo, o critério de ruptura de Coulomb. Através dele é possível a determinação do intercepto de coesão e ângulo de atrito

do solo. Os ensaios foram realizados segundo as recomendações da norma BS 1377-1 (BS, 1990).

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos no Laboratório de Análises Geotécnicas e Meio Ambiente (LAGEMA) da UFPR. O laboratório possui equipamentos com certificação de calibração externas e aferições internas, suas instalações possuem sistema de controle de temperatura.

Os ensaios foram realizados em prensa de cisalhamento direto, tipo deformação controlada. A tensão vertical do ensaio é aplicada através de pesos colocados em um pendural simples ou com braço de alavanca (1:4,5). Neste ensaio, o corpo de prova de solo é colocado no centro de uma caixa bipartida e sobre sua face superior se aplica a tensão vertical desejada. Através da imposição de um deslocamento horizontal constante em uma das partes da caixa, são medidas as forças de cisalhamento no plano de ruptura imposto ao corpo de prova pela divisão da caixa, além das leituras do deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da caixa e o deslocamento vertical do *cap* sobre as amostras durante o ensaio.

Para cada bloco amostrado foram realizados 6 ensaios de cisalhamento direto com amostras indeformadas de seção quadrada com aresta de 100 mm e altura de 20mm, tendo área total aproximadamente de 100 cm², utilizando as tensões verticais de 13,3 – 25,9 – 37,1 – 59,4 – 104,6 kPa. Sendo rompido um total de 30 corpos de prova.

Para a moldagem dos corpos de prova deve-se remover a camada superficial de parafina sobre o bloco e em seguida esculpir o corpo de prova prismático de base quadrada, com o auxílio de uma espátula com dimensões pouco superiores ao anel de moldagem. Posiciona-se o anel de moldagem, de dimensões e peso conhecidos, sobre o corpo de prova e remove-se o excesso de solo lateral do anel. Sem amolgar o solo, o anel deve ser inserido no solo e então realizar a regularização da face superior e inferior do corpo de prova. Cada corpo de prova deve ser pesado e com o solo proveniente das aparas da moldagem, ser realizada a determinação da umidade inicial do ensaio. Após a finalização da moldagem do corpo de prova o bloco deve ser reparaфинado e armazenado em câmara úmida no laboratório novamente.

O corpo de prova deve ser transferido do anel de moldagem para a célula de cisalhamento, seguindo a sequência ilustrada na Figura 41. Os anéis utilizados para a moldagem dos corpos de prova devem ser pesados após a transferência.

Aplica-se a tensão vertical do ensaio através da colocação de pesos no pendural simples ou/e no pendural com braço de alavanca e inicia-se então a fase de adensamento do corpo de prova e inunda-se a caixa de cisalhamento com água destilada no mesmo instante. A fase de adensamento dos corpos de prova deve ser realizada até a estabilização das deformações verticais.

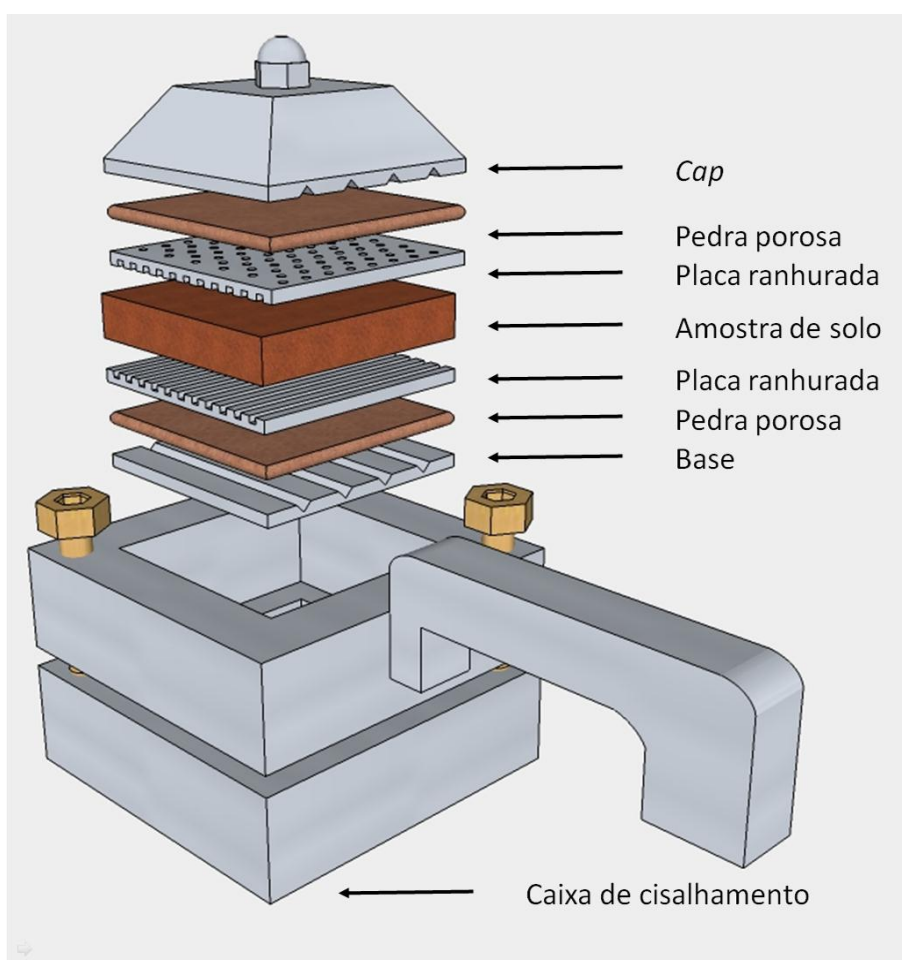


Figura 41 - Montagem da caixa de cisalhamento.

Nesse ensaio não se realiza controle da drenagem do corpo de prova. Contudo estima-se a livre drenagem ocorra durante o ensaio através da utilização de velocidades de cisalhamento adequadas, assim se aceita o ensaio como “drenado”.

A velocidade de cisalhamento é determinada através da curva de adensamento. Após a montagem da curva recalque x raiz do tempo (min), determinam-se os dois trechos lineares da curva, sendo a sua interseção o denominado t_{100} , como ilustrado na Figura 42.

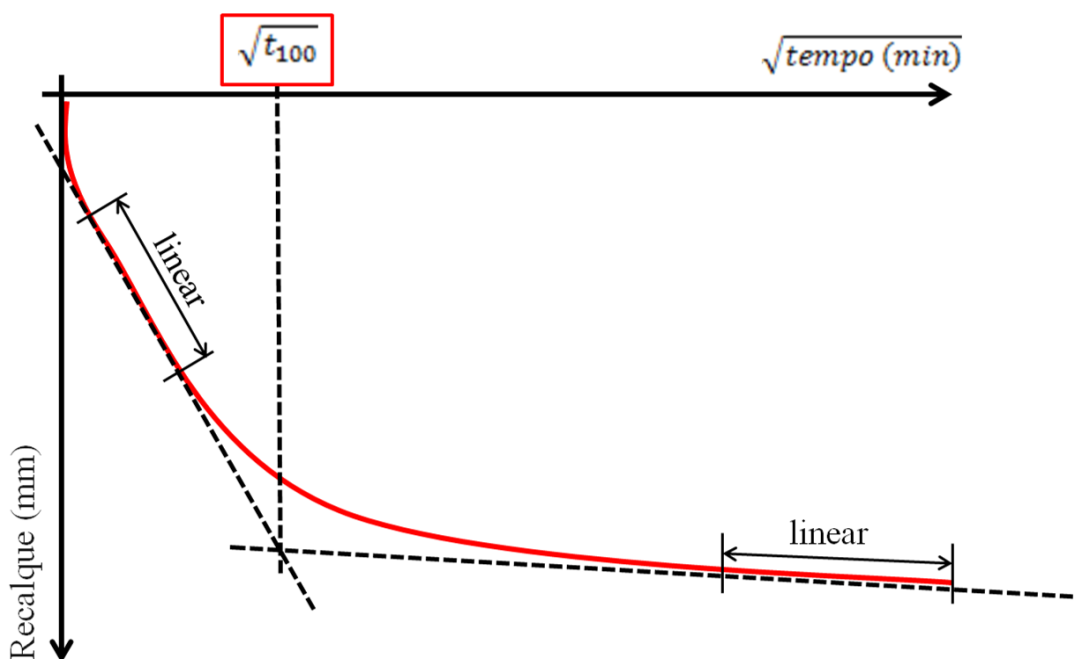


Figura 42 - Curva recalque x raiz quadrada do tempo.

Após calcula-se o tempo necessário para a ruptura pela Equação 6, conforme a Norma BS 13777:1990:

$$t_r = 12,7.t_{100} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

t_r = Tempo necessário para a ruptura, em minutos;

t_{100} = Tempo para ocorrência de 100% do adensamento primário, em minutos.

Este procedimento é realizado para se determinar o deslocamento necessário para mobilizar a resistência de pico. Muitas vezes, esse valor é obtido através da experiência do operador. A Tabela 7 fornece uma orientação para essa estimativa, sendo em caso de dúvidas utilizado sempre o menor valor.

Tabela 7 - Deslocamento típicos para a mobilização da resistência de pico em caixa de cisalhamento.

Tipo de solo	Deslocamento para mobilização da resistência de pico (mm)
Areia fofa	2 a 8
Areia densa	2 a 5
Argila plástica	8 (limite típico de ensaio)
Argila rija	2 a 5
Argila muito rija	1 a 2

Após essas definições é possível calcular a velocidade do ensaio através da equação:

$$v = \frac{d_r}{t_r} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

v = Velocidade de ensaio, em mm/min;

d_r = Deslocamento para mobilizar a resistência de pico, em mm;

t_r = Tempo para ruptura, em min.

Após a definição da velocidade de ruptura do ensaio, inicia-se a fase de cisalhamento, deve-se remover os parafusos da caixa de cisalhamento e realizar a ruptura da amostra com a velocidade definida, a cada 0,01mm de deslocamento horizontal. Devem-se realizar leituras do deslocamento vertical e da força tangencial além do tempo. Os corpos de prova foram ensaiados utilizando-se a técnica de estágio único. Para o cálculo da tensão vertical e da tensão de cisalhamento do ensaio, não foi realizada a correção da área efetiva do corpo de prova.

4.5. ENSAIO DE RETENÇÃO DE UMIDADE

A capacidade de retenção de água representa a umidade que o solo terá na maior parte do tempo, pois este fator está relacionado com a penetração de água no solo pelo efeito de capilaridade. Assim a resistividade nessa percentagem é a resistividade mínima, mais representativa do solo em campo (GCOI/SMC, 1995).

Para a medição dessa propriedade seguiu-se o seguinte procedimento descrito por Silva e Brasil (2010), baseado no projeto de norma da ABNT/CB-03 (2009) e nas recomendações técnicas da GCOI/SCM (1995):

- para a realização do ensaio de retenção a amostra deve estar seca ao ar, destorroada e peneirada previamente em peneira de malha de 2mm;
- em um funil de *Buchner* com medidas em torno de 5 cm de diâmetro e 2,5 cm de profundidade, acrescenta-se um papel qualitativo ao fundo do funil e enche-se além da capacidade o funil com a amostra de solo;
- vibra-se a amostra de solo contida no funil, deixando-se cair três vezes de uma altura de 1cm sobre uma superfície de madeira;
- nivela-se a superfície da amostra com uma espátula;
- coloca-se o funil cheio em um béquer de capacidade de 400mL, de forma que a maior abertura do funil fique para cima (Figura 43-a);
- adiciona-se água ao béquer lentamente, mantendo a altura de água no béquer abaixo da altura do papel filtro. Deve-se tomar o cuidado ao acrescentar a água, para que o nível de água não ultrapasse a zona de umedecimento, garantindo assim que a amostra fique úmida por capilaridade. Dessa maneira evita-se o aprisionamento de bolhas de água no interior da amostra;
- quando a amostra de solo apresentar na parte superior sinais de umidade, adiciona-se água até que seu nível aproxime-se ao topo do funil;
- cobre-se o béquer com um vidro de relógio invertido e deixa-se a amostra umedecida em repouso por no mínimo 12 horas;
- após o período de repouso, coloca-se o funil de *Buchner* com o vidro de relógio invertido sobre um *Kitassato* que esteja conectado a uma bomba de vácuo. Tomando-se o cuidado de vedar o funil com o *Kitassato* (Figura 43-b);
- aplica-se o vácuo mínimo de 88kPa (66 cm de Hg a 0°C) na amostra por 15 minutos;
- remove-se a amostra do funil transferindo-a para um recipiente previamente tarado, para a determinação do teor de umidade em porcentagem.

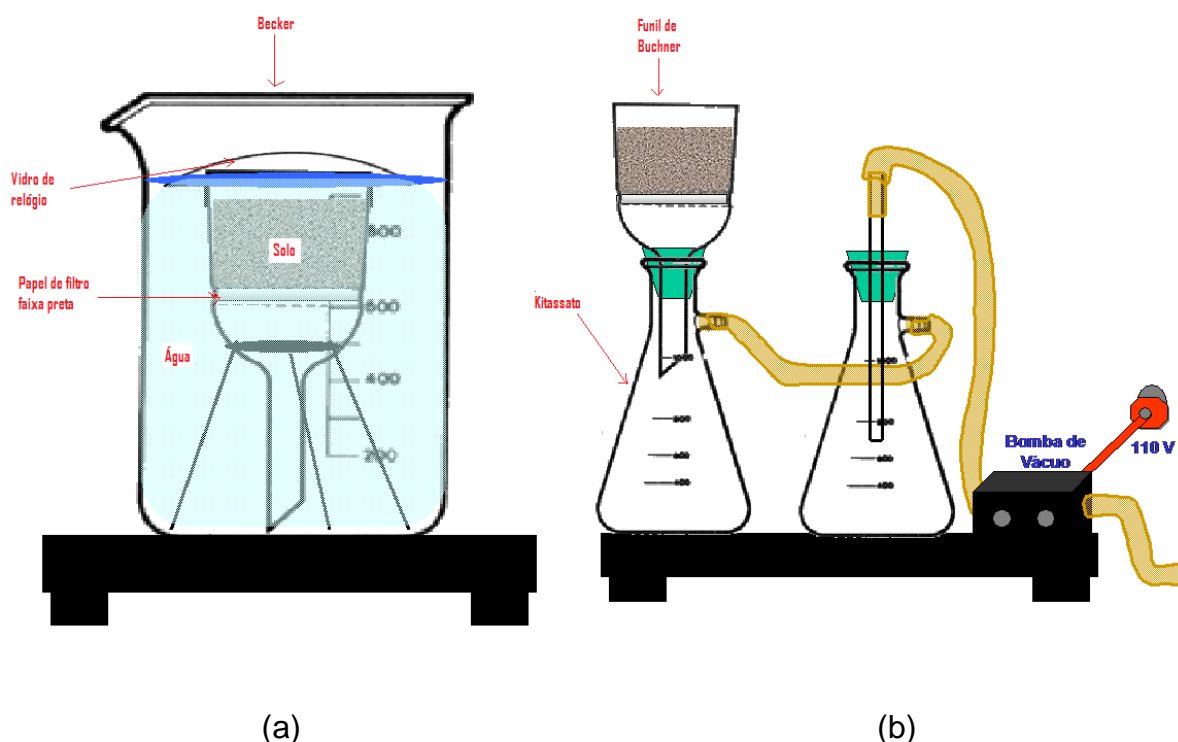


Figura 43 - Ensaio de retenção de água.

4.6. ENSAIO DE RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO

De acordo com a Norma Brasileira, a medida da resistividade do solo deve ser determinada em campo através de um Megger contendo dois terminais de corrente e dois terminais de tensão independentes e acessíveis (ABNT, 1981). O número de pontos a serem medidos é determinado por dois fatores: dimensão e importância do local e variação dos valores encontrados nas várias medidas. No entanto, o local onde será feita essa medição deve estar longe de interferências como canalizações metálicas enterradas ou dutos protegidos com proteção catódica. Com intuito de eliminar essas interferências, busca-se desenvolver um processo de obtenção da resistividade em laboratório. No III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção (1995), foi apresentada uma Recomendação Técnica para a obtenção da resistividade de solos em laboratório através da construção de uma curva de resistividade em função do teor de umidade do solo GCOI/SCM (1995). Recomenda-se a utilização de amostras deformadas na determinação da resistividade do solo.

Para o ensaio de resistividade em laboratório foram seguidos os procedimentos descritos abaixo, sendo eles baseados no projeto de norma da ABNT/CB-03 (2009), nas recomendações técnicas da GCOI/SCM (1995) e na norma internacional IS/IEC 62561-7 (2011).

A preparação das amostras se dá a partir do solo seco e destorroado passando pelas peneiras #10 (2mm) e #40 (0,42mm). Anotam-se as porcentagens retidas e passantes para se determinarem os percentuais de pedregulho, areia e silte com argila.

Com o solo seco passante na peneira de #40 (0,42mm) é acrescentado uma quantidade de água conhecida, assim se tem a amostra em uma umidade conhecida.

Como se deseja comparar os ensaios de laboratório com as amostras de campo e sabendo-se que o valor de resistividade é alterado dependendo da compacidade do material, optou-se por fixar o índice de vazios a cada medição da resistividade. Sendo assim, para todas as medições tem-se a mesma quantidade de grãos de solo dentro da “*Soil Box*”, alterando apenas a quantidade de água.

Conhecendo-se o volume da “*Soil Box*” e a umidade do solo a ser ensaiado, determinou-se a quantidade em massa de solo a ser inserida na “*Soil Box*” pela Equação 8:

$$M_s = \left(\frac{\gamma_g \cdot \left(1 + \frac{h}{100} \right)}{e_{nat} + 1} \right) \cdot V_{box}$$

Equação 8

Onde:

M_s = Massa de solo a ser inserida da “*Soil Box*” (g);

γ_g = Massa específica dos grãos (g/cm³);

h = Umidade do solo (%);

e_{nat} = Índice de vazios natural;

V_{box} = Volume da “*Soil Box*” (cm³).

Com a quantidade de solo determinada pela equação anterior, molda-se cuidadosamente a amostra dentro da “*Soil Box*” tentando-se manter o mesmo índice de vazio homogêneo pela amostra.

Aplica-se uma corrente elétrica através de um variador de voltagem (Varivolt), em um dos terminais de cobre da “*Soil Box*”. Com um multímetro paralelo ao circuito mede-se a voltagem aplicada na amostra. A resistência à passagem da corrente é medida através da amperagem por um multímetro conectado em série à placa de cobre, conforme ilustra a Figura 44. Realizam-se acréscimos de 10 volts na amostra e anota-se a sua respectiva amperagem. Inicia-se a construção da curva de resistividade em relação à quantidade de água adicionada, ou seja, para cada unidade é realizado este procedimento.

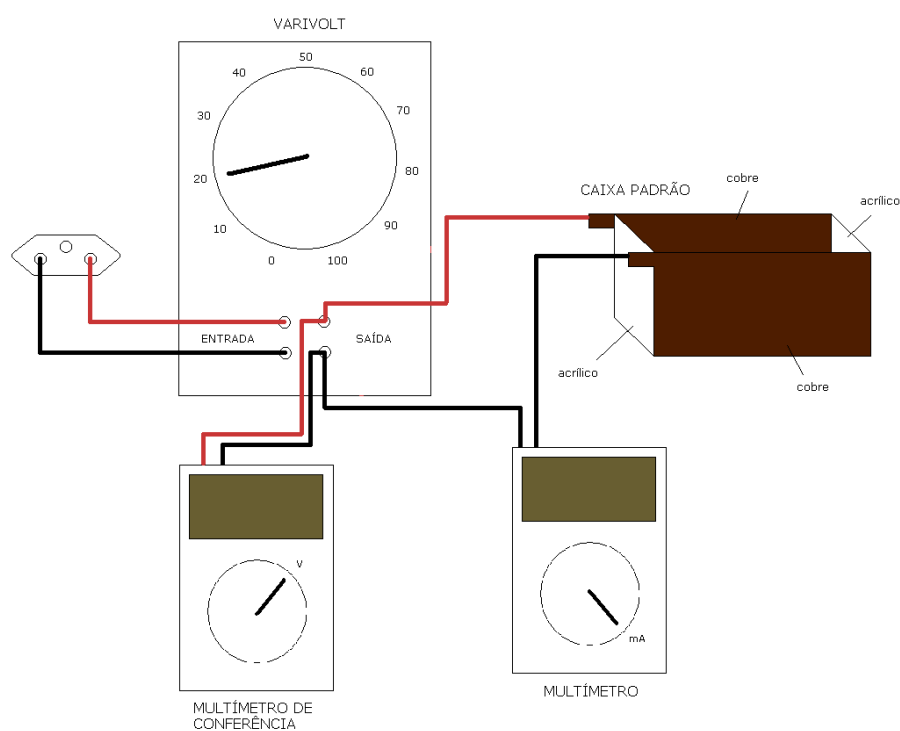


Figura 44 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade.

Retira-se a amostra da “*Soil Box*” e acrescenta-se água a ela para um novo teor de umidade e repete-se a operação de moldagem e leituras até o momento em que o acréscimo de água não apresente alterações significativas entre a leitura da amperagem da amostra na umidade atual e da amostra na umidade anterior. Há um momento em que a quantidade de água na amostra é tão elevada que a corrente

elétrica começa a ser conduzida principalmente pela água. Deve-se atentar para as leituras do multímetro em paralelo para que não se aplique corrente maior que a sua capacidade de leitura, pois por ele estar em paralelo, pode queimar ou perder a precisão.

Com as leituras obtidas durante o ensaio monta-se um gráfico de corrente *versus* diferença de potencial, ajustando-se uma reta passando pela origem, para a determinação da resistência. O coeficiente angular dessa reta é igual à resistência elétrica do solo para cada umidade (Figura 45).

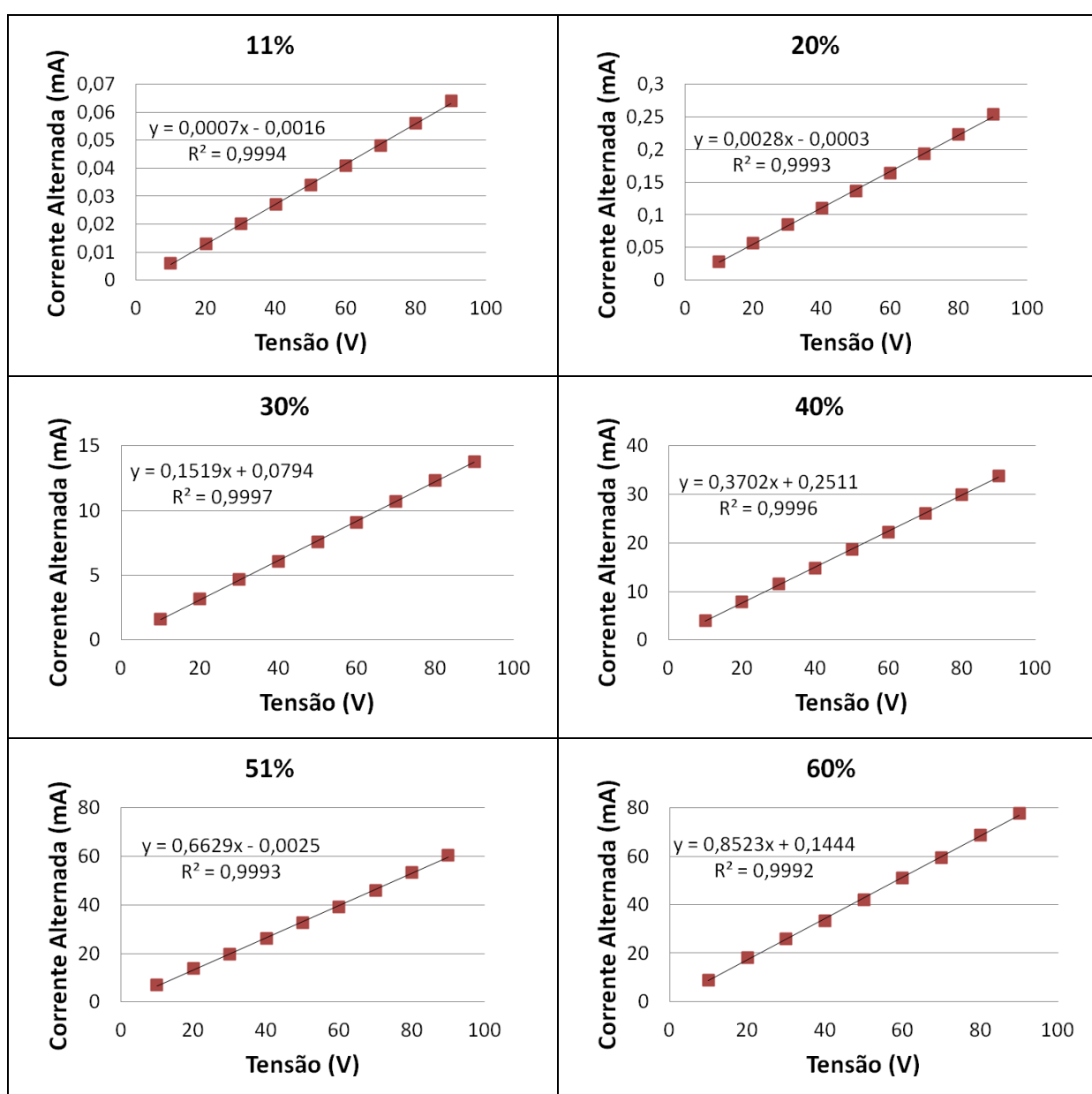


Figura 45 - Coeficiente angular para determinação da resistividade.

Como se repete o procedimento para vários teores de umidade obtém-se assim a variação da resistividade do solo em função da umidade. Observa-se que mesmo aparentemente a resistividade parecendo estabilizada (Figura 46a), ao se ampliar (zoom) no gráfico de resistividade *versus* umidade no trecho de menor resistividade, observa-se que a resistividade continua a diminuir com o acréscimo de umidade (Figura 46b).

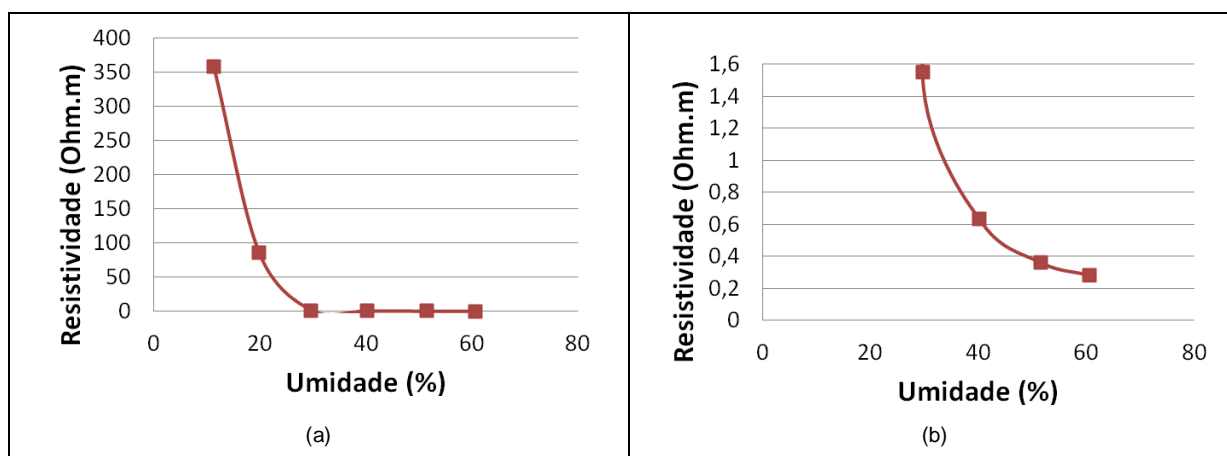


Figura 46 - (a) Gráfico da resistividade *versus* umidade, (b) zoom no final do gráfico.

Por isso optou-se por apresentar os resultados no eixo das ordenadas em escala logarítmica (Figura 47).

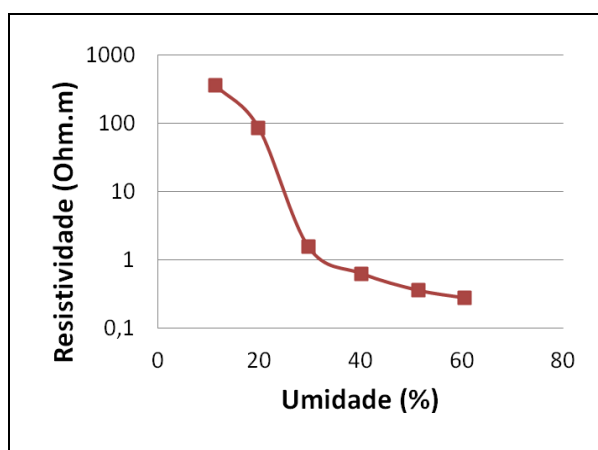


Figura 47 - Gráfico da resistividade *versus* umidade em escala log.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. GEOFÍSICA DE ELETORRESISTIVIDADE

Aos resultados da geofísica de eletrorresistividade por tomografia 2D, foram obtidos pela inversão das resistividades aparentes para resistividades reais, e nesses perfis foram sobrepostas as sondagens SPT a fim de auxiliar na interpretação do perfil.

O modelo de profundidade da resistividade real da **Linha 1** (Figura 48) mostra uma fina cobertura resistiva sobreposta à zona saturada, na qual são indicadas as principais descontinuidades condutivas (estações 160, 250, 370 e 430 m), intercaladas por núcleos de zonas resistivas, indicando a presença de maciço rochoso.

As descontinuidades condutivas (linha tracejada) indicam uma região onde a corrente elétrica tem maior facilidade de passagem, podendo chegar à conclusão de uma zona de descontinuidade resistiva norte-sul preenchida por água. Essas descontinuidades estão tangenciando a área onde ocorreu a ruptura (estações 260m e 380m) e atualmente está sofrendo o processo de rastejo do solo. Isso significa uma forte influência dessas descontinuidades no movimento do solo.

Observa-se ainda uma área de maior resistividade entre as estações 240 e 360m, próxima à superfície, indicadas em tons de branco, amarelo e azul claro. Acredita-se que esta alta resistividade deve-se ao fato da existência de grande quantidade de elementos de drenagem superficiais e profundos na área. Outro fator contribuidor para esse aumento da resistividade é o fato do solo estar menos compacto devido ao escorregamento ocorrido

Os modelos de profundidade da resistividade real das **Linhas 2 e 3** (Figura 49 e Figura 50) mostram um comportamento semelhante ao descrito anteriormente. Entretanto, são assinaladas duas descontinuidades condutivas (linha tracejada), situadas em torno das projeções das estações 250 e 440 m.

Observa-se também nessas duas linhas uma região de baixa resistividade, indicada em roxo, onde provavelmente há a presença de água nos vazios do solo, que vai até o topo do leito rochoso.

Na Linha 3 (Figura 50) na projeção da estação em 100m, há a presença de um córrego de aproximadamente 1 metro de largura e 30 cm de profundidade, fluindo em uma vala de mais de 2 metros de altura, indicando que em períodos de maiores índices pluviométricos, sua profundidade tende a aumentar.

O modelo de profundidade da resistividade real da **Linha 4** (Figura 51) mostra, além da cobertura resistiva, dois núcleos expressivos da zona saturada, cujas descontinuidades condutivas (estações 90, 240 e 300 m) são assinaladas, separadas por um trato resistivo.

O modelo de profundidade da resistividade real da **Linha 5** (Figura 52) mostra um comportamento semelhante ao anterior. Entretanto, o contraste entre a zona saturada e a rocha resistiva é vertical e abrupto, posicionado na estação 130 m. Descontinuidades condutivas são assinaladas nas estações 40 e 80 m.

As Linhas 1, 2 e 3, paralelas à faixa do duto, exibem significativas descontinuidades geelétricas condutivas, no contexto da zona saturada, que continuam em profundidade, respectivamente, em torno das estações 250, 370 e 430 m e 250 e 430 m. Já as Linhas 4 e 5, respectivamente, entre as estações 220-250 m e 160-180 m, mostram acentuadas zonas saturadas que persistem em profundidade não superiores a 38 metros.

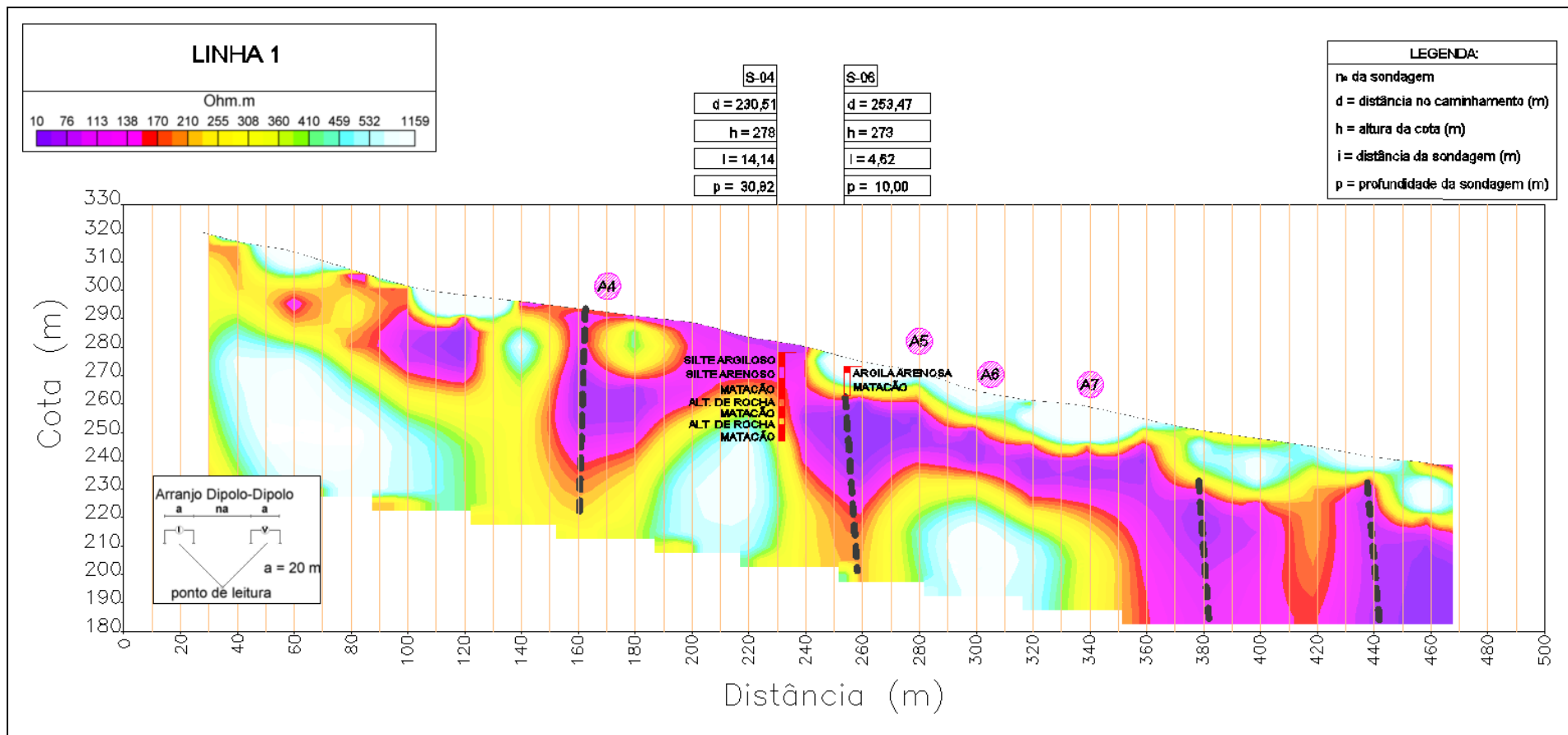


Figura 48 - Modelo da resistividade real da Linha 1 com a sondagem SPT.

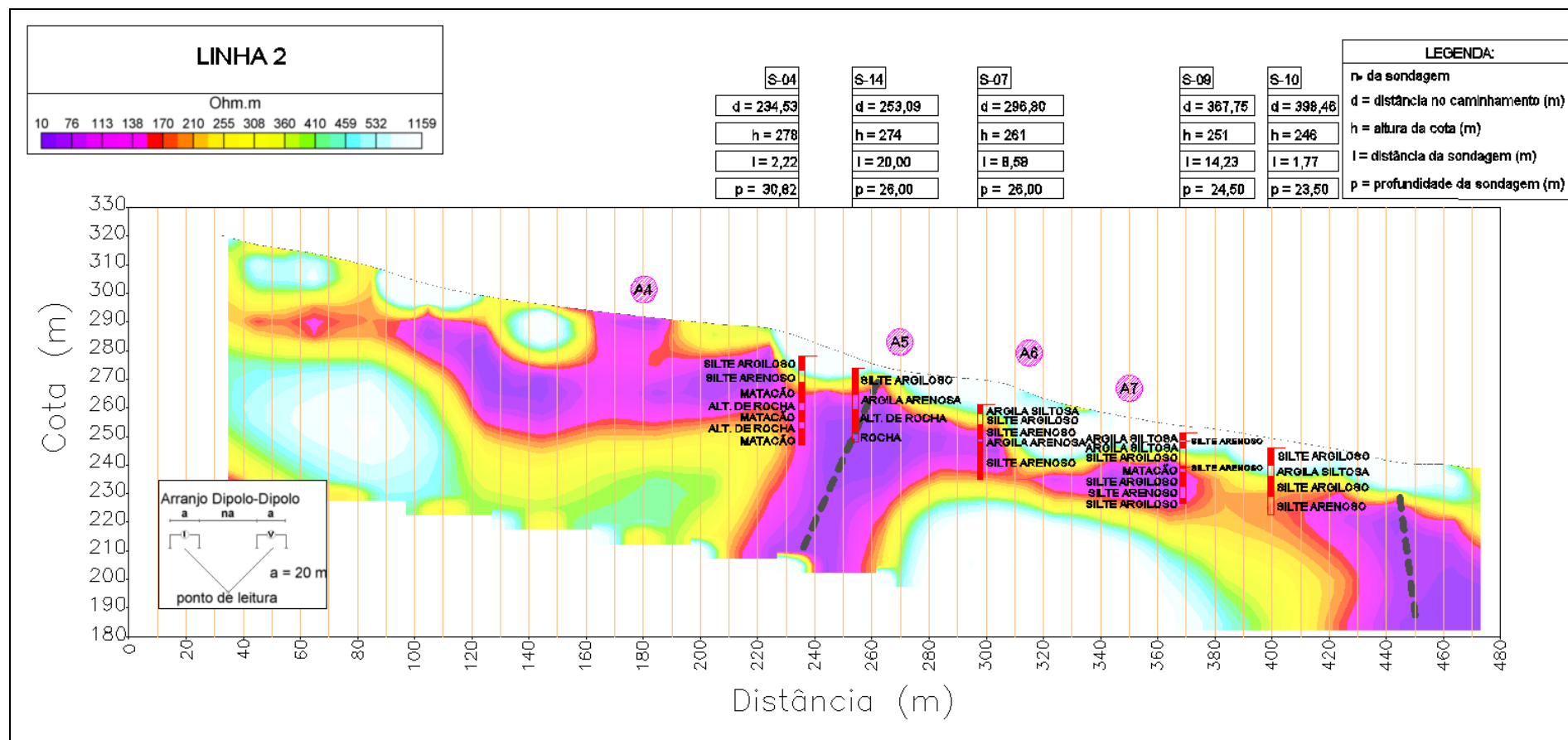


Figura 49 - Modelo da resistividade real da Linha 2 com a sondagem SPT.

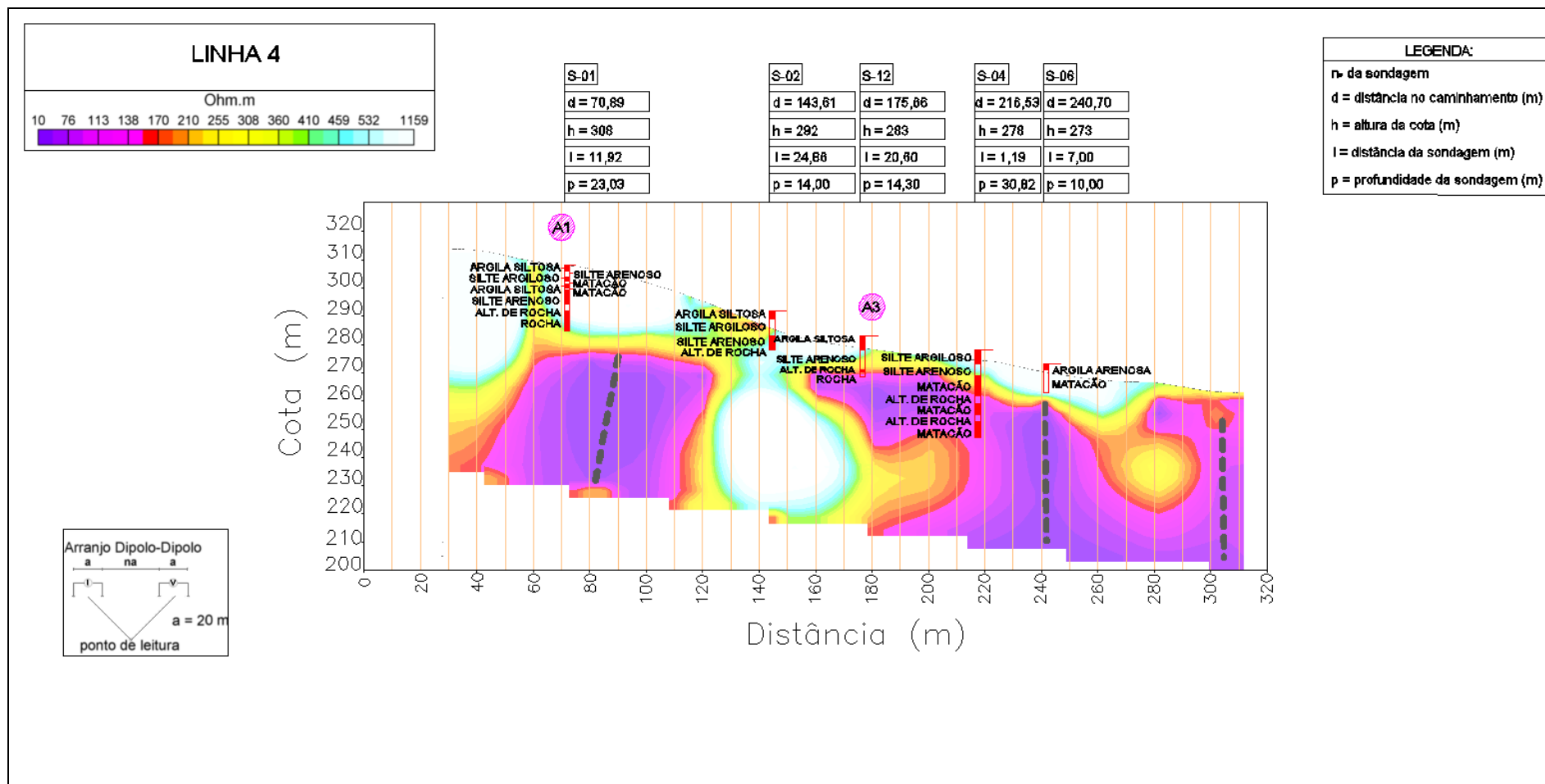


Figura 51 - Modelo da resistividade real da Linha 4 com a sondagem SPT.

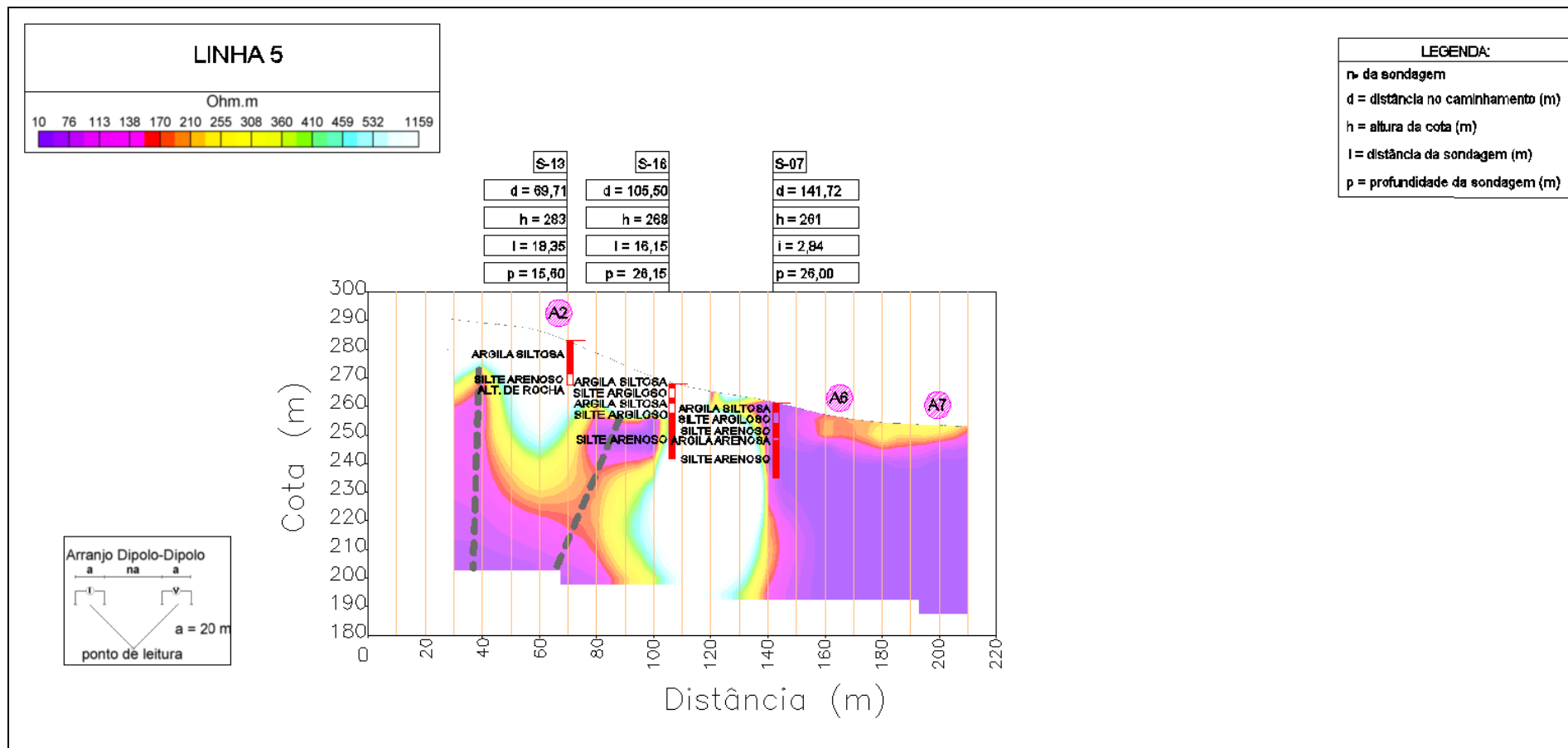


Figura 52 - Modelo da resistividade real da Linha 5 com a sondagem SPT.

5.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A fim de caracterizar os solos na sua condição natural foram determinados os parâmetros de peso específico, índice de vazios, umidade, grau de saturação e permeabilidade (Tabela 8).

Tabela 8 - Caracterização da condição natural da amostra.

Solo	γ_{nat} (kN/m ³)	e_{nat}	Umidade Natural (%)	Grau de Saturação Natural (%)	K_{20} (cm/s)
A1	15,92	1,75	54,2	31,0	$1,2 \times 10^{-3}$
A2	16,16	1,64	40,4	24,6	$3,0 \times 10^{-3}$
A3	14,72	2,17	59,0	24,2	$2,1 \times 10^{-3}$
A4	18,42	0,98	29,8	30,4	$8,8 \times 10^{-3}$
A5	15,80	1,93	58,3	30,2	$1,9 \times 10^{-3}$
A6	-	-	-	-	-
A7	16,19	1,32	40,90	31,0	$3,0 \times 10^{-3}$

Observa-se que as amostras tiveram valores de peso específico (γ_{nat}) entre 14,72 e 18,42 kN/m³, sendo essa variação está diretamente ligada com a compacidade do material. A amostra A3 que obteve maior índice de vazios (2,17) e a A4e apresentou menor índice de vazios (0,98), estando ela mais compacta em relação às demais amostras.

As amostras na condição de campo tiveram a umidade natural variável. Porém quando se comparado com o grau de saturação dessas amostras, observou-se que a amostras A2 e A3 estão com valores próximos a 24% e as demais amostras com valores próximos de 31%, sendo elas semelhantes entre si.

As amostras foram submetidas aos ensaios de permeabilidade a carga constante pela NBR 13292 (ABNT, 1995), determinando-se assim o coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20°C (K_{20}) onde as amostras apresentaram valores na grandeza de 10^{-3} cm/s, indicando uma permeabilidade média a baixa.

Os resultados dos ensaios de massa específica dos grãos, limites de Atterberg e alguns índices dos solos são apresentados na Tabela 9. As amostras apresentaram valores de massa específica dos grãos (γ_g) entre 2,738 e 3,056 g/cm³.

Tabela 9 – Massa específica, limites de Atterberg e índices dos solos.

Solo	γ_g (g/cm ³)	LL (%)	Umidade Natural (%)	LP (%)	IC	IP (%)	IA	IG
A1	2,925	80	54,2	49	0,83	31	0,44	20
A2	3,056	64	40,4	40	0,98	24	0,56	18
A3	3,056	94	59,0	53	0,85	41	0,58	20
A4	2,738	49	29,8	34	1,28	15	0,61	8
A5	2,959	87	58,3	51	0,80	36	0,53	20
A6	2,740	43	-	32	-	11	0,61	3
A7	2,736	51	40,90	40	0,92	11	0,40	7

Os limites de Atterberg indicam a influência dos finos argilosos no comportamento do solo. Com exceção da amostra A4, pode-se notar que as demais amostras apresentam os teores de umidade natural das amostras se situam entre os valores de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), indicando que os finos do solo se encontram em campo no estado plástico. Sabe-se que teoricamente o solo deveria estar saturado a partir do limite de contração, o que não aconteceu com as amostras no estado natural, com grau de saturação entre 25 a 31%.

Esse comportamento pode ser observado pelo Índice de consistência (IC) que indica a posição relativa da umidade natural da amostra aos limites de mudança de estado calculado pela Equação 9.

$$IC = \frac{LL - h}{LL - LP} \quad \text{Equação 9}$$

Quando o teor de umidade é igual ao LL, IC=0. À medida que o teor de umidade diminui, o IC aumenta, ficando maior do que 1 quando a umidade fica menor do que o LP.

Logo pode-se observar que a amostra A4 apresenta valor de IC superior a 1, indicando que ela se encontra em campo com umidade superior ao do Limite de Plasticidade. As demais amostras apresentam IC entre 0,98 e 0,80, sendo assim os finos do solo se encontram com umidade natural no estado plástico.

Segundo Skempton (1953) *apud* Vargas (1978) o Índice de Atividade das argilas indica o grau de influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidal da fração argila nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso e é determinado pela Equação

$$IA = \frac{IP}{\% < 0,002mm} \quad \text{Equação 10}$$

Todas as amostras apresentaram atividade de argilo minerais menores que 0,75, indicando serem inativas com presença de caulinita.

Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Tabela 10 através dos percentuais retidos nas faixas granulométricas e na Figura 53 são ilustradas as curvas granulométricas das amostras deformadas.

Tabela 10 - Análise Granulométrica.

Amostra	Argila (< 0,002 mm)	Silte (0,002 ↔ 0,06 mm)	Areia (0,06 ↔ 2 mm)	Pedregulho (2 ↔ 60 mm)	Pedra (> 60 mm)
A1	70,9	17,8	11,3	0	0
A2	42,8	32,6	24,5	0	0
A3	71,2	10,5	18,2	0	0
A4	24,7	25,6	49,2	0,5	0
A5	68,4	18,8	12,3	0,5	0
A6	18,0	29,6	47,5	0,5	4,4
A7	27,8	30,1	39,0	0,5	2,6

Da análise dos ensaios granulométricos, segundo a ABNT conclui-se que as amostras A1, A2, A5 são classificados como argila siltosa, as amostras A4, A6, A7 como areia siltosa e a amostra A3 como argila arenosa.

Com as informações dos limites de Atterberg as amostras foram classificadas de acordo com o sistema de classificação unificada dos solos (SUCS). As amostras foram classificadas em ML – Silte de baixa plasticidade ou MH – Silte de alta plasticidade, ou seja, todos os solos devem apresentar comportamento típico de silte com plasticidade variando de média a alta (Tabela 11).

Tabela 11 – Classificação Granulométrica.

Solo	ABNT	SUCS
A1	Argila siltosa	MH Silte de alta plasticidade
A2	Argila siltosa	MH Silte de alta plasticidade
A3	Argila arenosa	MH Silte de alta plasticidade
A4	Areia siltosa	ML-MH Silte de média plasticidade
A5	Argila siltosa	MH Silte de alta plasticidade
A6	Areia siltosa	ML-MH Silte de média plasticidade
A7	Areia siltosa	ML-MH Silte de média plasticidade

A síntese dos resultados dos ensaios de caracterização é apresentada no Anexo I – Quadro resumo dos ensaios de caracterização.

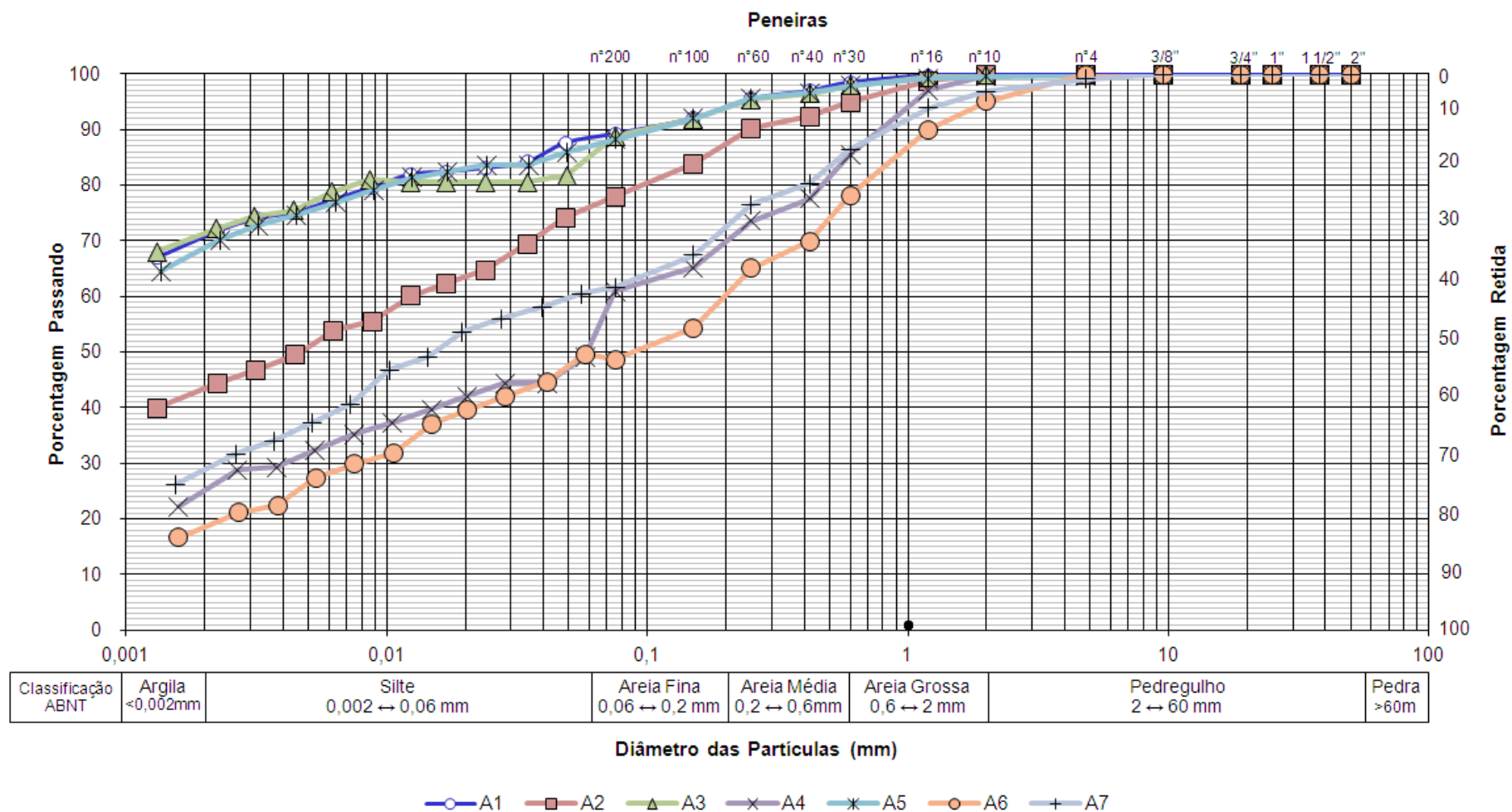


Figura 53 - Curva Granulométrica.

5.3. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto de todas as amostras, conforme as especificações da BS 1377-1 são apresentadas no Anexo II – Ensaio de Cisalhamento.

As amostras A1, A2, A5 e A7 apresentaram na curva tensão *versus* deformação horizontal comportamento crescente com a tensão cisalhante para os deslocamentos máximos alcançados durante os ensaios, usando-se como exemplo a amostra A2 (Figura 54).

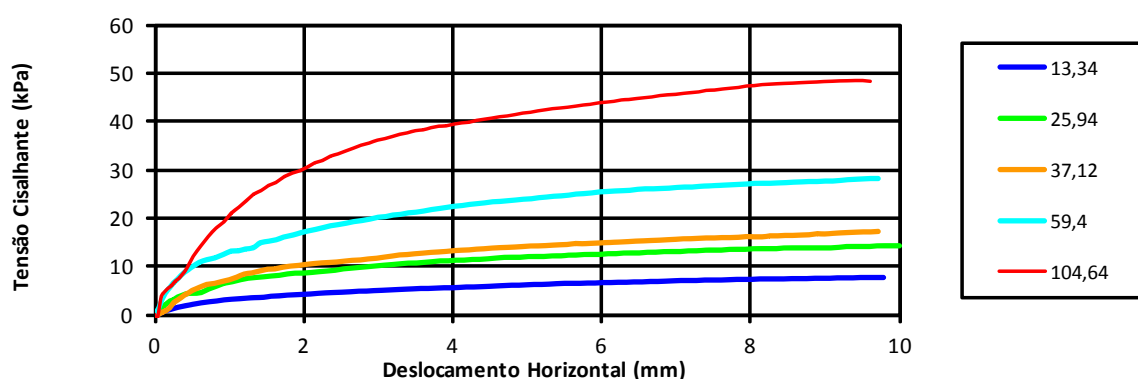


Figura 54 - Tensão cisalhante crescente com o deslocamento horizontal – Amostra A2

As demais amostras (A3 e A4) sofreram ruptura plástica com mobilização das tensões máximas ocorrendo com grandes deslocamentos horizontais, chegando a apresenta suave pico, como se observa na Figura 55, correspondente à amostra A4.

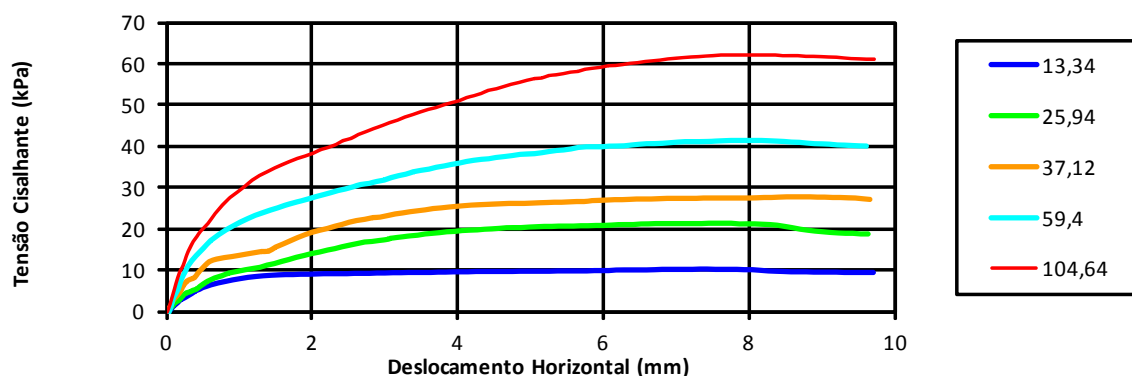


Figura 55 - Ruptura plástica - Amostra A4.

Nas curvas deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, o comportamento predominante foi de compressão, aumentando com a tensão normal. A exceção foi verificada na tensão de 13,3 kPa da amostra A4 (Figura 56), onde essa amostra apresentou dilatação, provavelmente pela baixa tensão vertical aplicada a uma amostra com baixo índice de vazios (0,98).

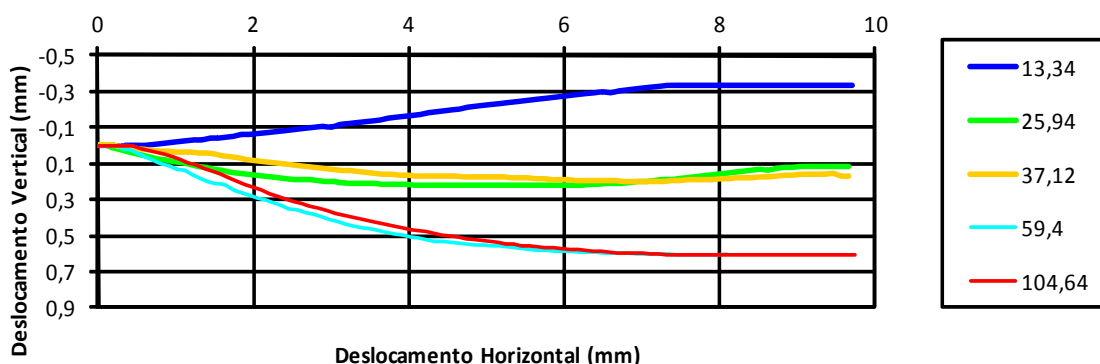


Figura 56 – Corpo de prova de 13,3 kPa apresentou comportamento de dilatação – Amostra A4.

A amostra A1 (Figura 57), apresentou resistência de 332 kPa para tensão confinante de 59,4 kPa, enquanto as demais amostras na mesma condição apresentaram no máximo tensão cisalhante de 41 kPa. Observa-se que o corpo de prova com tensão confinante de 104 kPa apresentou resistência menor que o corpo de prova na tensão de 59,4 kPa, sabendo-se que esse comportamento não é esperado.

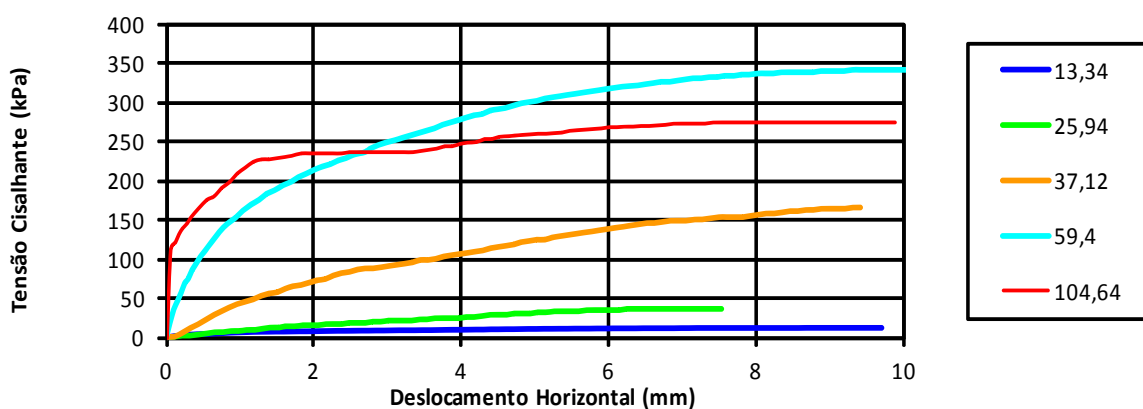


Figura 57 - Tensão Cisalhante *versus* Deslocamento horizontal - Amostra A1.

Desta maneira a amostra A1, apresentou envoltórias de resistência elevadas, com coesão de 8,4 kPa e ângulo de atrito de 72,6° (Figura 58). Pode-se dizer que estes valores são bastantes elevados se for considerado que se trata de um solo coluvionar, localizado na cunha de onde o maciço sofreu a ruptura. Logo, este fato leva a acreditar que os corpos de prova com tensões cisalhantes de 59,4 kPa e de 37,1 kPa devem ser reensaiados. Devido a isso, essa amostra será desprezada nas nossas análises posteriores.

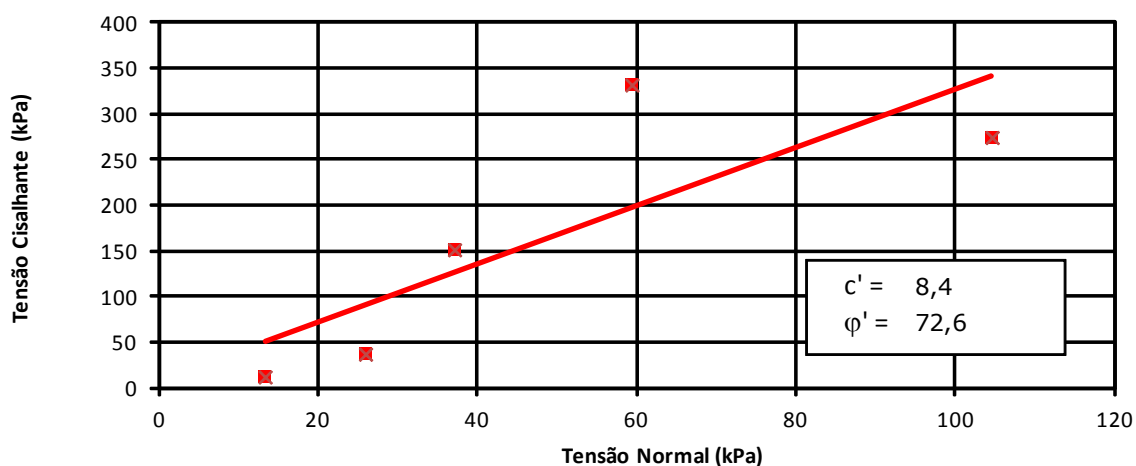


Figura 58 - Tensão cisalhante *versus* Tensão Normal da Amostra A1.

As demais envoltórias de resistência foram agrupadas na Figura 59, onde se podem observar que os valores dos ângulos de atrito interno das amostras oscilam próximos de um valor médio igual a 25,5°. Esse valor é bastante compatível com as condições de solo que sofreu movimentação de massa e por se tratar de um colúvio em estado fofo. Além disso, os valores estão coerentes com o fato de existirem teores das frações finas (silte e argila) significativas, sendo que a presença dessa matriz de finos deve governar a resistência ao cisalhamento do solo. Nestas condições, as partículas de areia e pedregulho se encontram dispersas na matriz fina, existindo pouco contato entre elas. Isso pode explicar o fato de amostras com teores de areia diferentes apresentarem ângulos de atrito similares.

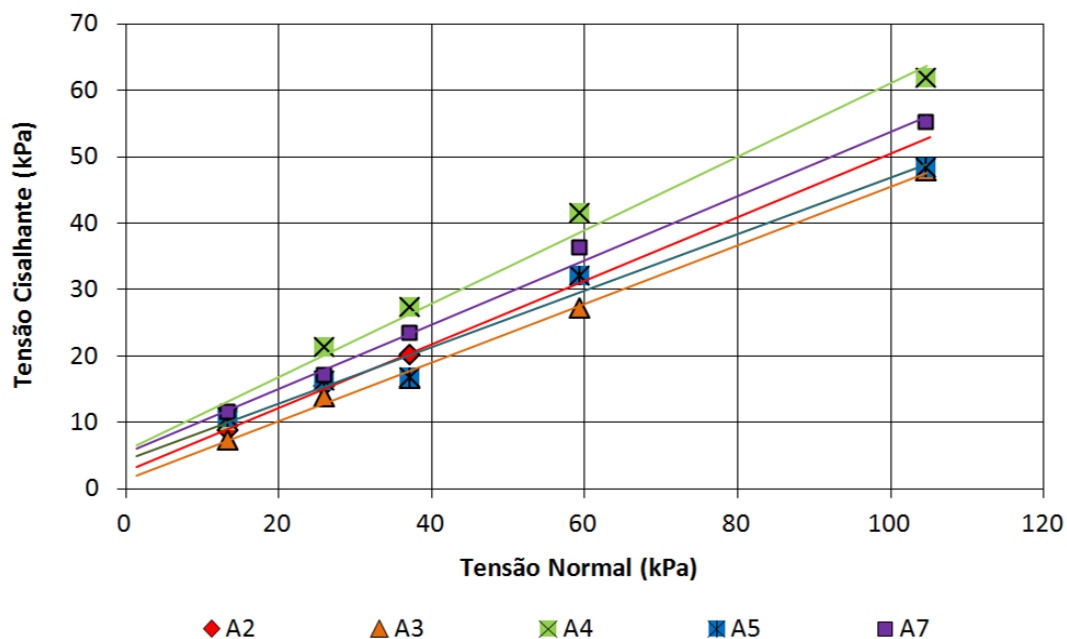


Figura 59 - Envoltórias de resistência obtidas dos ensaios de cisalhamento direto.

Na Tabela 12 são apresentados os resumos dos valores de coesão e ângulo de atrito interno das amostras, determinados graficamente. Pode-se notar que os solos ensaiados apresentam uma pequena coesão, com valor médio em torno de 4 kPa. É possível, no entanto, que a coesão do solo se aproxime de zero, caso ele venha a ser completamente saturado. Vale lembrar que o ensaio de cisalhamento é feito com a amostra simplesmente submersa, o que não garante a sua saturação.

Tabela 12 - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
A1	8,4	72,6
A2*	2,6	25,6
A3	1,3	23,8
A4	5,8	28,9
A5	4,4	23,0
A7	5,4	25,9

* considerando apenas 3 tensões normais

Os ensaios de cisalhamento direto realizados com a amostra A1 resultaram em valores de ângulo de atrito muito elevados, devendo ser eliminados. Novos ensaios serão realizados para obtenção dos parâmetros de resistência da amostra.

Suzuki (2004), também realizou em sua pesquisa ensaios de cisalhamento direto inundado na área em estudo, sendo que suas amostras continham área de 25cm² e as tensões confinantes foram de 25, 50, 100, 200 e 400 kPa. Na Tabela 13, apresenta o comparativo entre as duas pesquisas.

Tabela 13 - Comparativo do ensaio de cisalhamento.

Suzuki (2004)			Neste Trabalho		
Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Amostra	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
P7-A7	18	28,4	A1	-	-
P7-A8	12	33	A2	2,6	25,6
P8-A10	13	28,3	A3	1,3	23,8
P9-A12	21	30,5	A4	5,8	28,9
P10-A14	18	29,3	A5	4,4	23
P16-A16	2	34,6	A7	5,4	25,9

Observa-se que Suzuki (2004) encontrou valores de coesão entre 2 a 21 kPa e ângulo de atrito entre 28,3 a 34,6°, no entanto nessa pesquisa encontrou-se valores de coesão entre 1,3 a 5,8 kPa e ângulo de atrito de 23 a 28,9°. Na Tabela 14 observa-se as médias encontradas entre os ensaios, observando-se que o desvio padrão para a coesão de 7,14 kPa e do ângulo de atrito de 3,71°, estando dentro da faixa de valores observado para solos coluvionares.

Tabela 14 - Análise estatística dos ensaios de cisalhamento.

Valor médio de Suzuki (2004)		Valor médio Neste Trabalho		Desvio Padrão		Coeficiente de variação do ângulo de atrito (%)
Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	
14	30,7	3,9	25,4	7,14	3,71	12,1 14,6

Os coeficientes de variação do ângulo de atrito, determinado pela divisão do desvio padrão pela média, ficou entre 12 a 14 %, observando que os valores entre as duas pesquisas são pouco significativos se comparados, à heterogeneidade dos solos coluvionares, a diferença nos tamanhos dos corpos de prova ensaiados e as tensões confinantes aplicadas.

5.4. ENSAIOS DE RETENÇÃO DE UMIDADE

Na Figura 60, observam-se os resultados do ensaio de retenção de umidade.

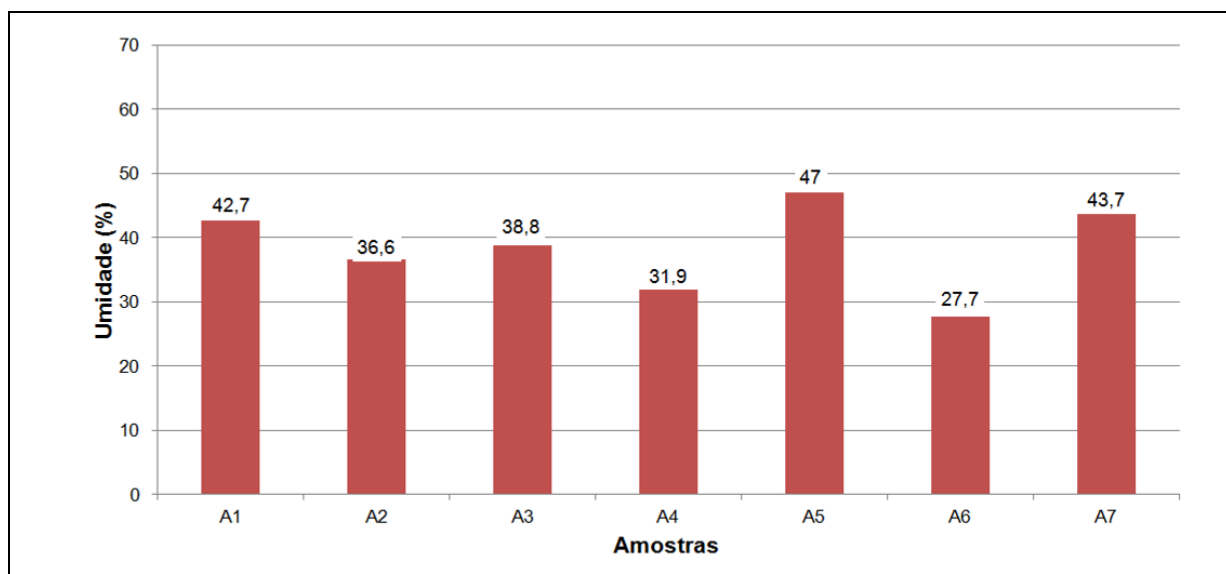


Figura 60 - Ensaio de retenção de umidade em solos.

Na Figura 61, apresenta-se o resultado de resistividade de solos com a umidade natural, e observa-se que a maioria das amostras apresentou a umidade natural acima da umidade de retenção de umidade. Nas amostras A4 e A7 os valores da umidade natural foram um pouco inferiores ao ensaio de retenção podendo-se dizer que o ensaio está dentro da média aceitável. A amostra A3, no entanto, apresenta valores muito discrepantes em relação à umidade natural, sugerindo a repetição do ensaio de retenção de umidade.

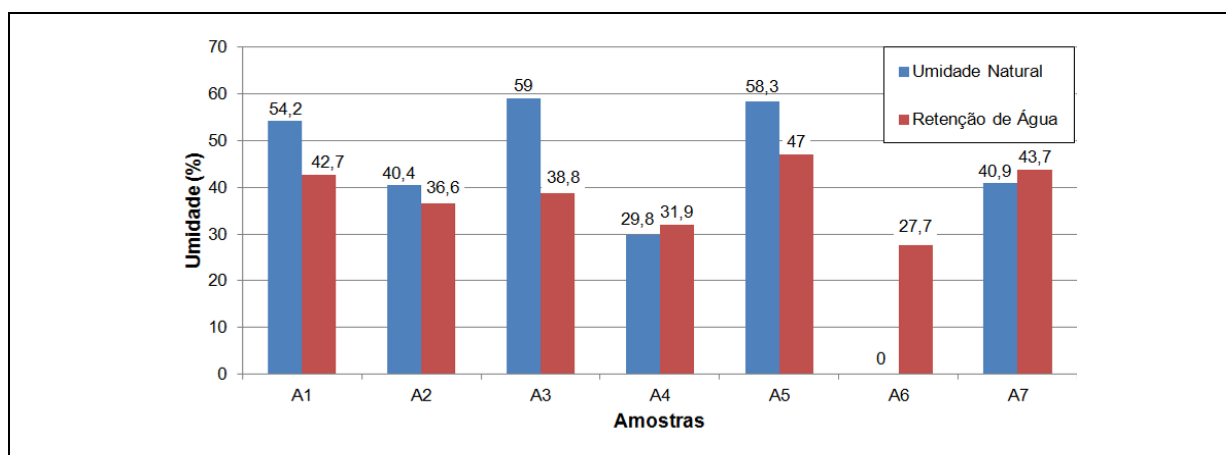


Figura 61 - Comparativo do ensaio de retenção de umidade com a umidade natural.

5.5. ENSAIO DE RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO

Como uma das maiores dúvidas com relação à resistividade do solo foi o tamanho da influência gerada pela variação de umidade, optou-se pela realização do ensaio em laboratório utilizando as amostras já coletadas em campo.

Na Figura 62, apresentam-se as curvas de resistividade em função da umidade. Observa-se que os ensaios foram realizados até o momento em que a resistividade do solo não sofresse grandes variações e ao final da curva que a amostra permanece constante.

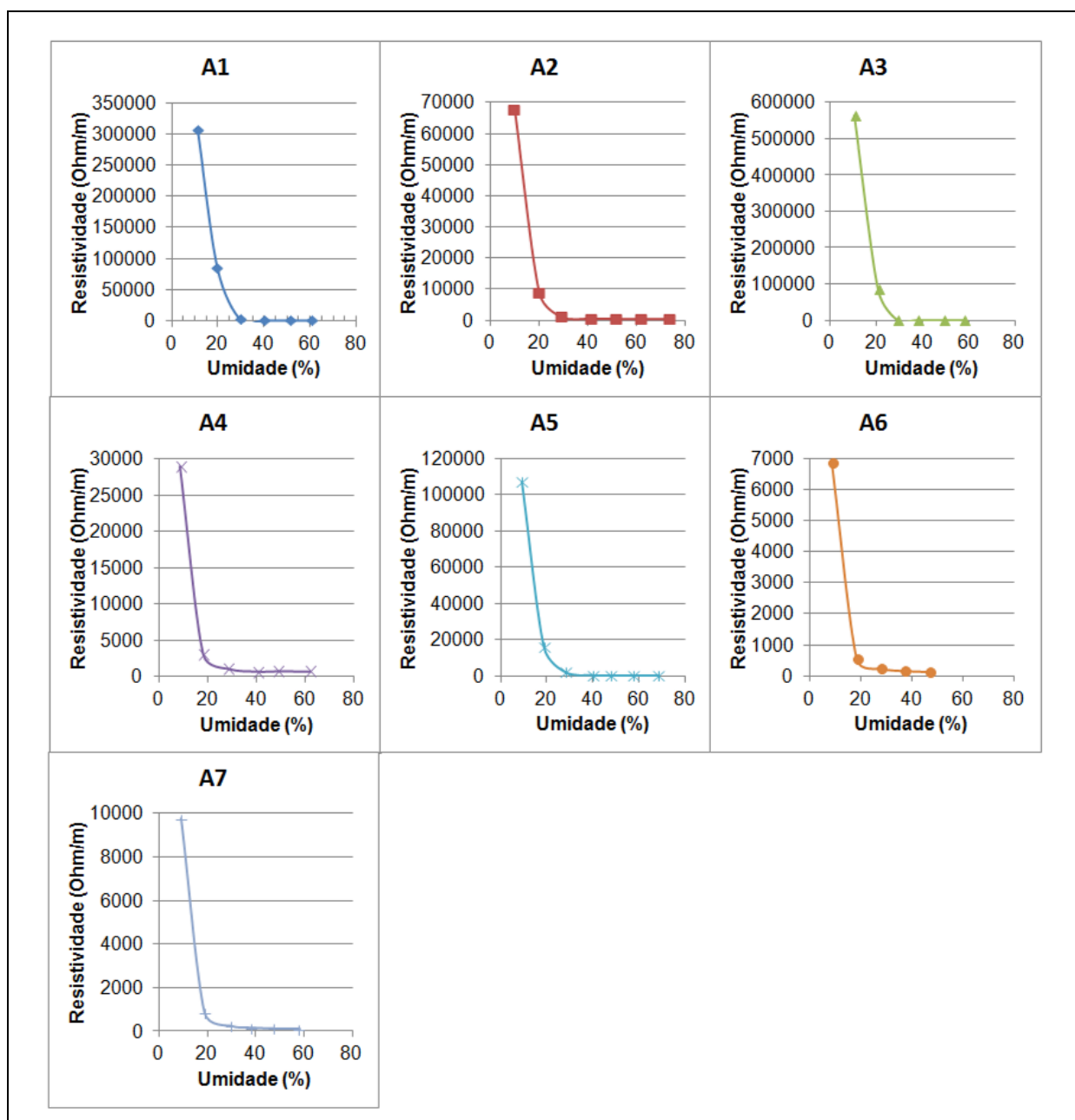


Figura 62 - Resultados dos ensaios de resistividade.

Como a escolha dos locais de coleta de amostras levou em consideração a variação de resistividades, tentando-se uma melhor representatividade da área estudada. Desta maneira, pode-se estimar a magnitude da influencia dos fatores umidade e mineralogia do solo investigado.

Para melhor visualização dos resultados na Figura 63 foram apresentados os resultados da resistividade em escala logarítmica. Pode-se observar que, em elevados teores de umidade o solo continua a ter uma leve redução da sua resistividade com o acréscimo de umidade.

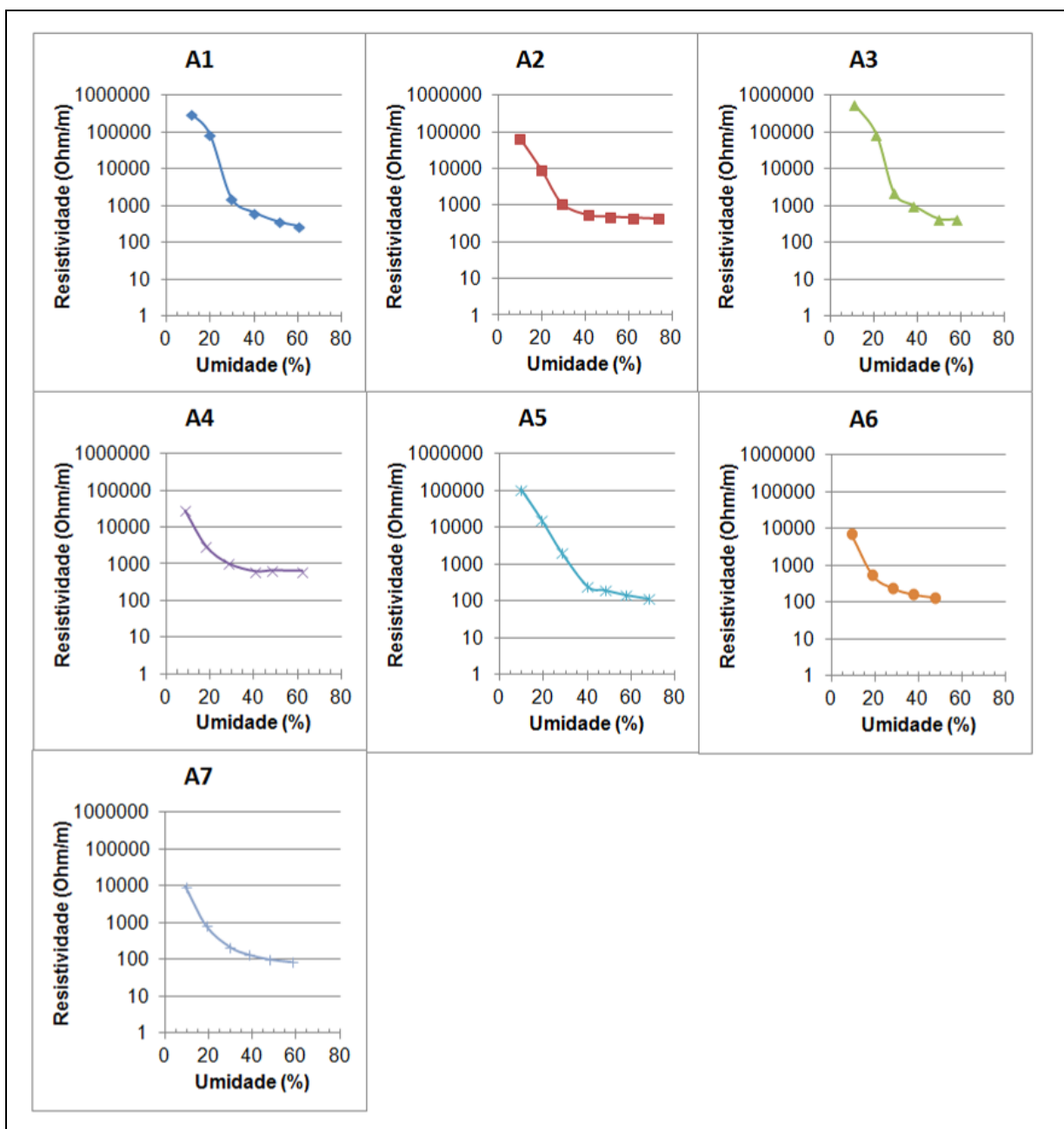


Figura 63 - Resultados dos ensaios de resistividade em logaritmo.

Na Figura 64, encontram-se as curvas de umidade (%) versus resistividade (Ohm/m) para os sete pontos de amostragem. Nas curvas resultantes deste experimento, observou-se que as amostras que apresentaram maiores valores de resistividade foram a de argila arenosa (A3) e as de argila siltosa (A1, A5, A2). As amostras que apresentaram menores valores de resistividade foram as de areia siltosa (A4, A7 e A6).

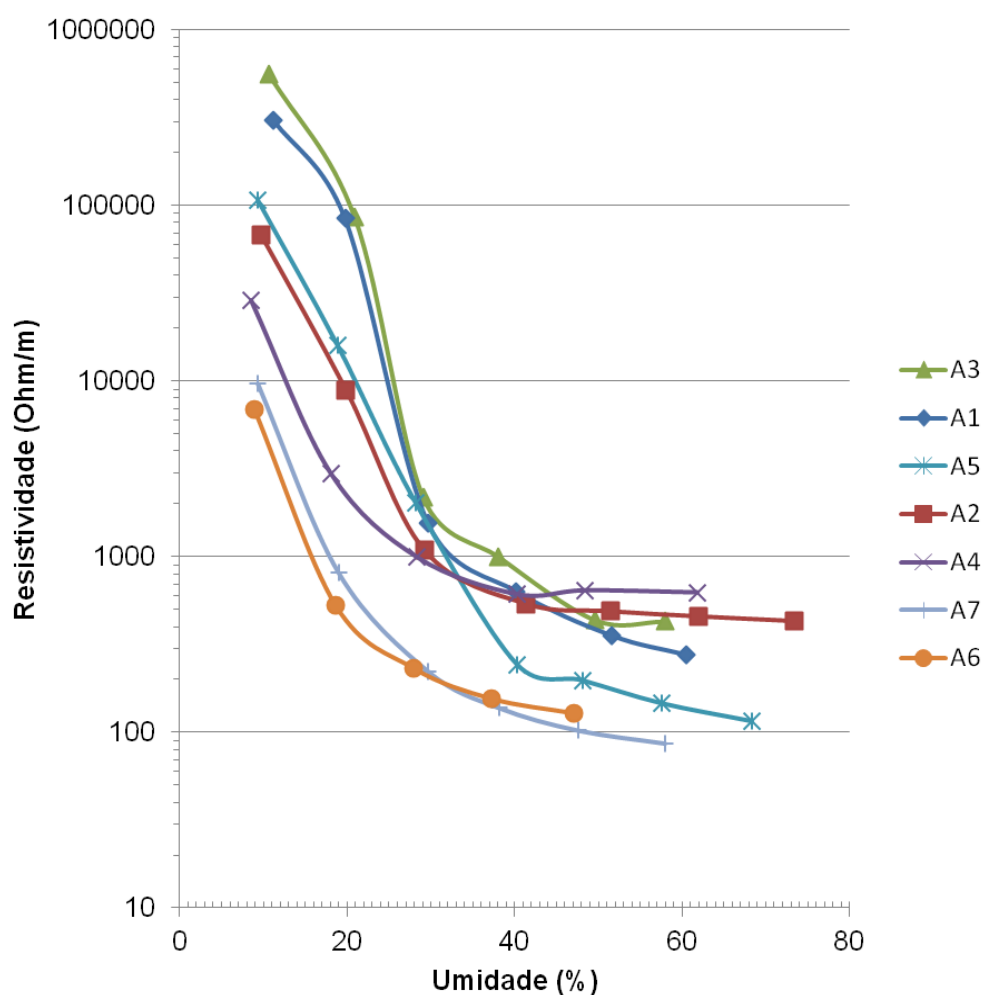


Figura 64 - Ensaio de resistividade em solos.

Ainda na Figura 64, pode-se observar que as amostras argilosas apresentaram alta resistividade em umidades menores, mostrando que quanto maior o teor de umidade, menor é a sua resistividade. Este comportamento já era esperado, contudo pôde-se notar que a variação desta resistividade com a umidade é diferente para cada tipo de solo, porque depende do índice de vazios.

As amostras arenosas também tiveram sua resistividade elétrica diminuída com o aumento da umidade. Porém, as argilas foram mais sensíveis ao acréscimo de água do que as areias.

Na Figura 65, pode-se observar uma variação da resistividade mínima entre as amostras, sendo possível se dividir em dois grupos: As amostras de A1 a A4 com resistividades mínimas superiores a 250 Ohm.m, enquanto as amostras A5, A6 e A7 apresentaram resistividades mínimas na ordem de 100 Ohm.m. Demonstrando assim que entre as amostras mesmo com elevada umidade, apresentam resistividades mínimas divergentes. Assim as amostras A5, A6 e A7 atentem a ser mais condutivas que as demais amostras.

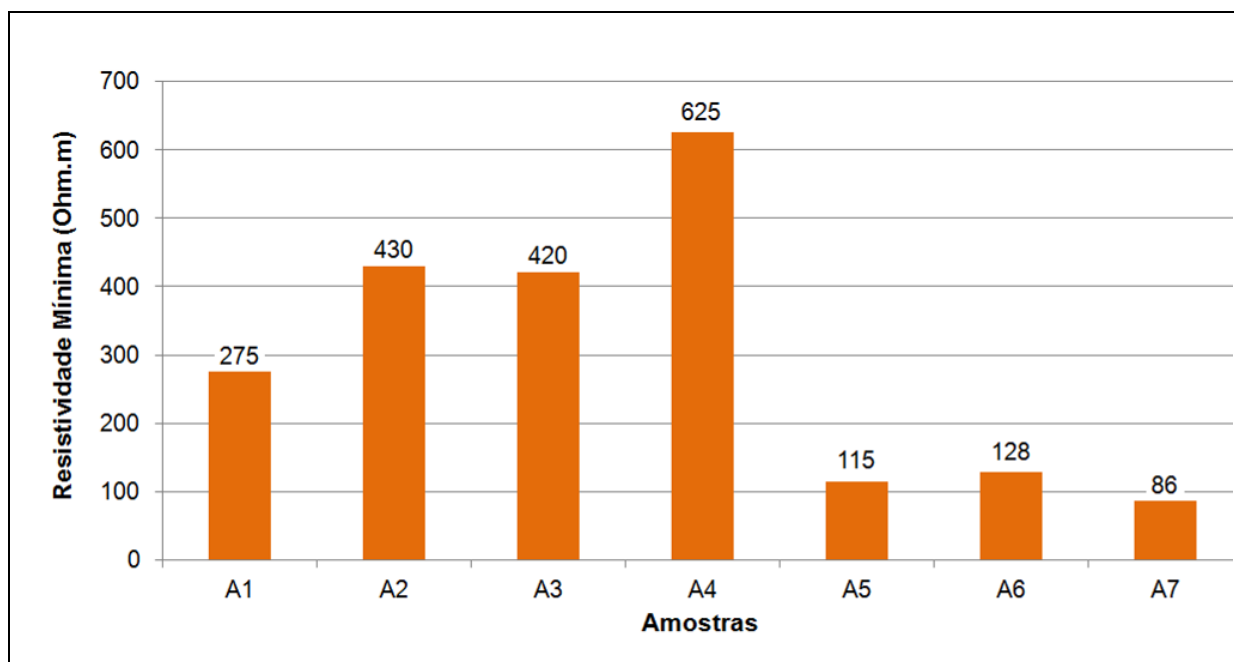


Figura 65 - Resistividade mínima de laboratório.

5.6. COMPARATIVO DAS RESISTIVIDADES I

A fim de se observar a diferença da resistividade entre as amostras, foi determinada as resistividades graficamente para o teor de umidade do ensaio de retenção e para a umidade natural (Figura 66).

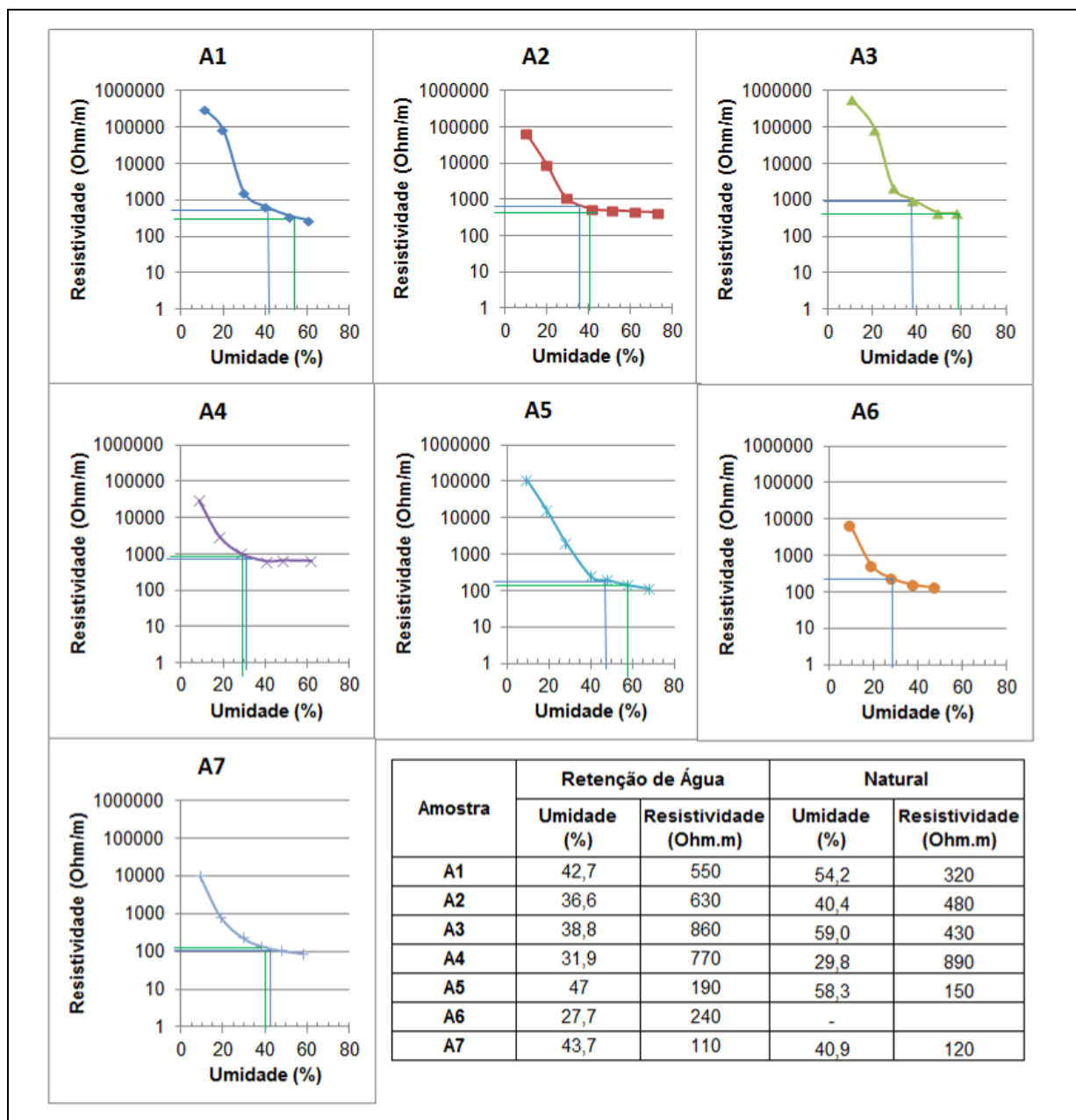


Figura 66 - Determinação da resistividade nos ensaios.

Os valores das resistividades da geofísica foram determinados no ponto de coleta da amostra nas pseudo-seções. Na Tabela 15, apresenta os valores de resistividades para cada situação.

Tabela 15 – Resistividade do solo – Resistividade em Laboratório x Geofísica.

Amostra	Mínimo	Natural		Retenção de Água		Geofísica
	Resistividade (Ohm.m)	Umidade (%)	Resistividade (Ohm.m)	Umidade (%)	Resistividade (Ohm.m)	Resistividade (Ohm.m)
A1	275	54,2	320	42,7	550	650 (L1)
A2	430	40,4	480	36,6	630	1560 - 810 (L5)
A3	420	59,0	430	38,8	860	275 (L3) / 372 (L4)
A4	625	29,8	890	31,9	770	163 (L1)
A5	115	58,3	150	47	190	625 - 450 (L1)
A6	128	-	-	27,7	240	650 (L1) / 470 (L2) 210 (L5)
A7	86	40,9	120	43,7	110	260 (L5)

Na Figura 67 apresenta um comparativo entre as resistividades na umidade natural, na retenção de umidade e da geofísica nas áreas das amostras.

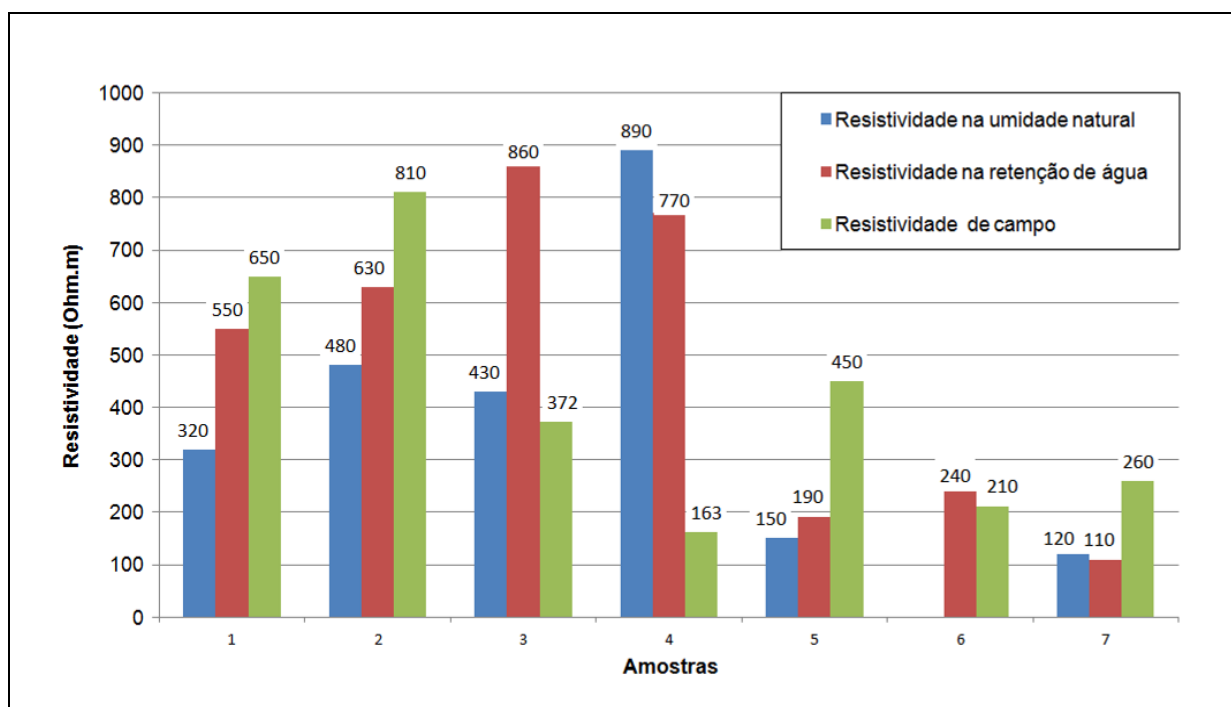


Figura 67 - Comparativo de resistividades. – Laboratório x Superficial da Geofísica

Com os dados interpolados da geofísica e do ensaio de eletrorresistividade em laboratório chegam-se às seguintes conclusões:

a) a amostra **A1** foi retirada a 170 metros no L4, portanto a resistividade da geofísica foi de **650** Ohm.m, já a resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (42,7%) foi próximo de **550** Ohm.m. Observa-se que para essa amostra tem-se valores entorno de 600 Ohm.m, tanto no ensaio de campo quanto de laboratório diferença de 15%;

b) a amostra **A2** foi retirada a 65 metros no L5, portanto a resistividade da geofísica para a superfície foi de 1560 Ohm.m, porém pode-se observar na Figura 52, que a amostra encontra no centro de uma área resistiva lembrando que o programa de interpolação extrapola os valores para a superfície, sendo assim preferiu-se para esse caso determinar-se a resistividade para 1,5 metro sendo assim a resistividade em **810** Ohm.m. A resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (36,6%) foi próximo de **630** Ohm.m. A diferença entre os ensaios da geofísica e laboratório nessa amostra foram de 22%, pressupõe-se que a geofísica pode estar com valor elevado de resistividade devido à acentuada declividade do terreno, assim no campo o solo tende a se manter em uma umidade mais baixa que a do ensaio de retenção de umidade e por conseguinte representa um acréscimo na resistividade na geofísica em relação ao laboratório. Também pode-se analisar o fato de estar no campo seco do gráfico, pouca diferença na umidade pode gerar uma grande queda na resistividade;

c) a amostra **A3** foi retirada as linhas L3 e L4, sendo em 225 metros na L3 e 180 metros na L4 e sendo a resistividade da geofísica de 275 e **372** Ohm.m respectivamente. Observa-se aí uma discrepância entre os valores de resistividade real de campo, que deveria ser a mesma nas duas linhas, pois o ponto avaliado é o mesmo. Isso provavelmente se deve à utilização de modelos numéricos aproximados de cálculo da resistividade real em relação à medida, que afeta os resultados de campo apresentados. Já a resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (38,8%) foi próxima de **860** Ohm.m. Observa-se que nos ensaios da geofísica o valor ficou por volta de 325 Ohm.m enquanto o de laboratório em 860, sendo uma diferença bastante significativa por volta de 165%;

d) a amostra **A4** foi retirada a 170 metros na L1, portanto a resistividade da geofísica foi de **163** Ohm.m. Já a resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (31,9%) foi próxima de **770** Ohm.m. Parece que para essa amostra acontece o mesmo que para a amostra A3. A resistividade de laboratório ficou muito acima da de campo;

e) a amostra **A5** foi retirada a 270 metros na L2, portanto a resistividade da geofísica foi de **625** Ohm.m, no entanto, quando se observa o posicionamento da amostra A5 na linha L1 (Figura 49), a amostra encontra-se em uma região de incerteza do ensaio da geofísica, uma vez que os dados são interpolados para a superfície, assim ao se determinar o valor para a geofísica em 1,5 metros de profundidade o valor reduz para 450 Ohm.m, já a resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (47%) foi próximo de **190** Ohm.m. A resistividade em laboratório foi menor que a resistividade em campo, uma diferença de 58%.

f) a amostra **A6** foi entre as linhas L1 e L2, a 305 metros na L1 ou 315 metros na L2 e, portanto a resistividade da geofísica foi de 650 e 470 Ohm.m respectivamente, e a 165 metros sobre a L5, com **210** Ohm.m. A resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (27,7%) foi próximo de **240** Ohm.m. Pode-se dizer que essa coleta está entre as linhas L1 e L2, porém a amostra encontra-se localizada sobre a L5. As diferenças observadas entre esses caminhamentos podem ser devidas às diferenças climáticas nos dias de trabalhos de campo: no dia em que foi realizado o levantamento na L1 e L2 eram um dia ensolarado, enquanto da L5, um dia mais úmido e com garoa fraca. Isso pode ser uma das causas dessa diferença nos valores de resistividade, para esse ponto. Pode-se observar que tanto no campo quanto no laboratório as resistividade para a L5 ficaram em torno de 200 Ohm.m, com uma diferença de 14%;

g) a amostra **A7** foi retirada a 200 metros da L5, portanto a resistividade da geofísica foi de **260** Ohm.m, já a resistividade do solo obtida em laboratório no ponto de retenção de água (43,7%) foi próxima de **110** Ohm.m. Para essa amostra as diferenças entre os ensaios de campo e de laboratório ficaram em 58%.

No comparativo entre os ensaios de resistividade da geofísica e de laboratório, observou-se uma dificuldade em se determinar os pontos de coleta para uma boa comparação entre os dois métodos, quando a amostra encontrava em um meio extremamente resistivo como a amostra A2 na L5, a interpolação dos resultados para superfície se mostrou irreal, O mesmo fato aconteceu para a amostra A5 na L2, de as amostras se encontrou em uma região de descontinuidade resistiva encontrando-se dificuldade de se determinar o real valor para a amostra nos ensaios geofísico.

Medidas de resistividade elétricas determinada pelos métodos geofísicos estão relacionadas com uma propriedade específica do solo, por exemplo, resistividade. Um dos problemas nessa medição está em controlar uma propriedade do solo, ou seja, se fixar apenas uma variável durante o ensaio, como, umidade e densidade do solo. Logo, os valores de resistividade em campo, indicam a mudança das propriedades do solo *in situ*, porém sem o um refinamento de qual característica realmente foi alterada (Pozdnyakov; Pozdnykova; 2002).

Por sua vez, o ensaio de geofísica foi realizado com espaçamentos entre eletrodos de 20 metros, esse foi um dos responsáveis pela diferença nos resultados observados entre os dos ensaios, uma vez que a malha para a interpolação dos dados ficou espaçada para uma precisão do valor pontual da resistividade de campo.

Outra incerteza foi em se determinar qual o valor da resistividade medido em laboratório deveria ser utilizado para análise, uma vez que as propriedades dos solos estão intimamente ligadas com o valor medido. Optou-se pelo valor da resistividade na umidade de retenção de água, porém sabe-se que a pequenas variações da umidade do solo podem gerar elevadas variações da resistividade, principalmente para umidades abaixo de 30%.

No ensaio de resistividade em laboratório, foi possível a identificação de dois grupos principais de amostras através de suas resistividades mínimas (Figura 65), o que não foi possível identificar com essa análise, motivando a realizar uma nova análise que se identifica a presença de grupos distintos nos resultados da geofísica, demonstradas na seguir.

5.7. COMPARATIVO DAS RESISTIVIDADES II

Após a primeira análise das resistividades dos solos, observou-se uma dificuldade em se classificar o solo pela resistividade no ensaio da geofísica. No ensaio de resistividade em laboratório foi possível a identificação de dois grupos principais de amostras através de suas resistividades mínimas. A fim de se tentar observar esses grupos também no ensaio da geofísica, optou-se por se determinar a resistividade e a queda ôhmica, no primeiro nível de leituras e o na menor distância em relação às coletas das amostras.

A queda ôhmica (RI) pelos químicos é a mudança de potencial ao produto da corrente pela resistência da solução contida entre a superfície do eletrodo de corrente e do eletrodo de potencia (AGOSTINHO *et al.*, 2004).

Ao se determinar os dados exatamente no $n=1$ e não superficialmente, tem-se valores medidos sem que esses valores estejam interpolados pelo programa analítico.

Na Tabela 16, observam-se os valores da injeção de corrente elétrica (I) no eletrodo de corrente, em seguida tem-se o valor da queda Ôhmica (RI) no eletrodo de potencial. O fator k é a constante do espaçamento a cada 20 metros para transformas esses dados em resistividade no ponto.

Tabela 16 - Resultados da geofísica para $n=1$ próximo da coleta de amostras.

Amostra	I (μ A)	RI (μ V)	k	Resistividade (Ohm.m)
A1	240	345	376	541
A2	140	302	376	813
A3	180	47,2	376	98
A4	120	61,85	376	194
A5	130	52,4	376	151
A6	80	11,5	376	54
A7	100	6,7	376	25

Na Figura 68, as amostras A1 e A2 apresentam elevada queda ôhmica enquanto indicando que essas amostras tendem a ter elevados valores de resistividade. As demais amostras apresentaram valores de queda ôhmica abaixo de 62 μ V, indicando que as amostras tendem a ter baixa resistividade.

Através dos valores de queda ôhmica onde foram realizadas as coletas das amostras foi possível a identificação de dois grupos distintos de amostras, assim como as resistividades mínimas no ensaio de resistividade em laboratório (Figura 65).

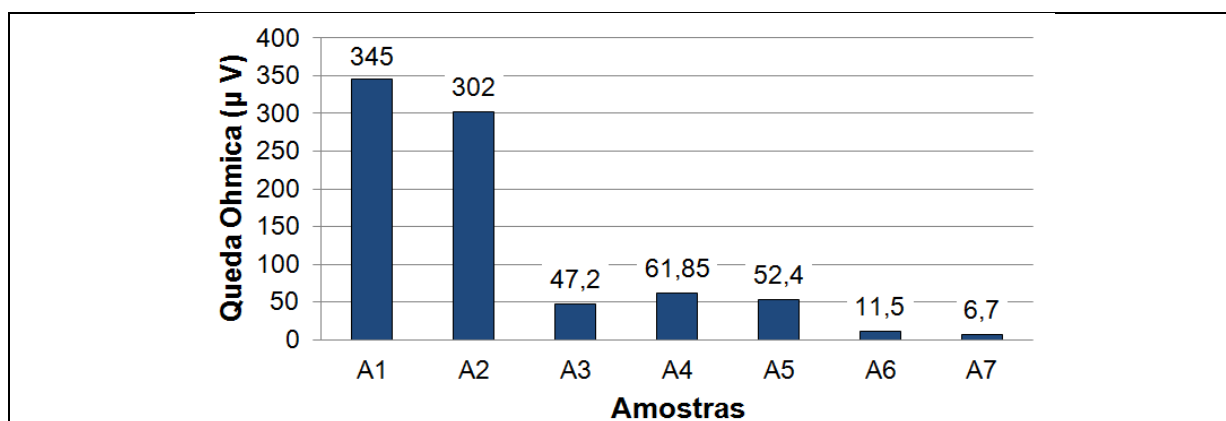


Figura 68 – Queda Ôhmica do ensaio de geofísica n=1 para os locais de coleta das amostras

Ao se comparar os valores de resistividades de laboratório na umidade de retenção de água e a resistividade do ensaio da geofísica para o primeiro nível, observa-se uma menor variação entre os resultados de campo e os de laboratório (Figura 69). Para a amostra A1 e A5, ocorreu um melhor ajustes entre os resultados de resistividades. Além das amostras A5, A6 e A7 apresentarem uma diminuição no valor da resistividade. A amostra A2 permaneceu com valores parecidos da análise anterior. No entanto as amostras A3 e A4 apresentaram-se como tendo elevada resistência nos ensaios de laboratório e baixas resistividades em campo, isso aconteceu devido ao fato da amostra nesse nível em campo encontrar-se saturada.

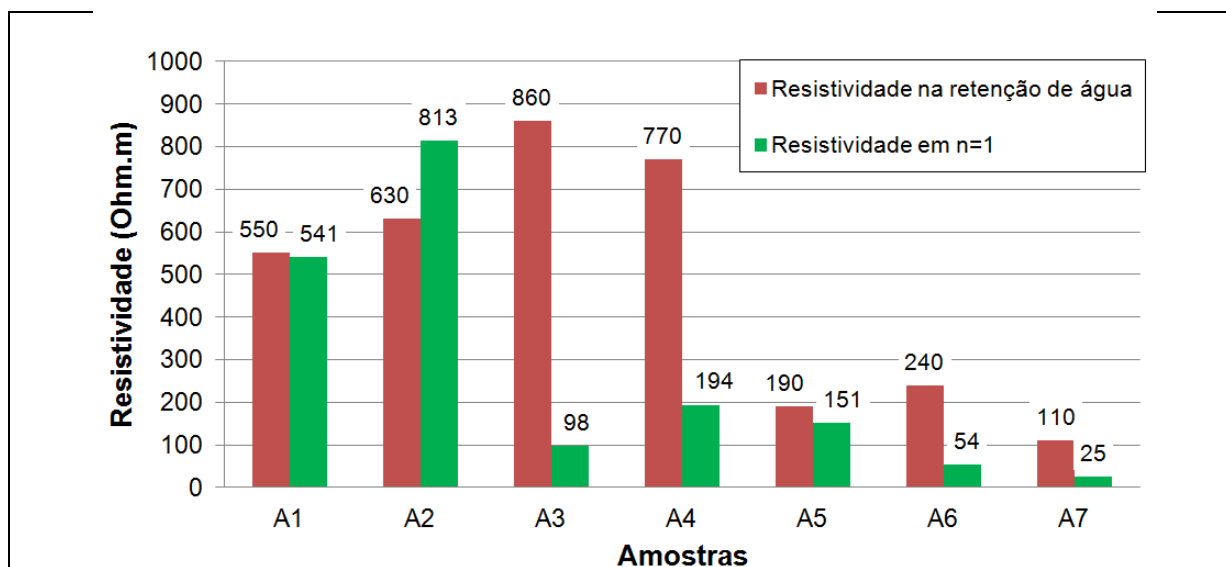


Figura 69 – Comparativo de resistividades. – Laboratório x nível 1 da Geofísica.

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foram aperfeiçoadas as informações sobre a encosta onde ocorreu o acidente com o oleoduto Araucária – Paranaguá (OLAPA) em Morretes-PR. A encosta está sendo monitorada com inclinômetros, piezômetros e pluviômetro.

A fim de se conhecerem melhor as propriedades do subsolo da região foram realizados ensaios geofísicos de eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo com espaçamento entre eletrodos de 20 metros. Nas pseudos-seções geradas pela geofísica, foi possível observar descontinuidades condutivas indicando uma região onde a corrente elétrica tem maior facilidade de passagem, podendo chegar à conclusão de uma falha norte-sul preenchida por água. Essas descontinuidades estão tangenciando a área onde ocorreu a ruptura, que atualmente está sofrendo o processo de rastejo, indicando uma forte influência das descontinuidades eletrorresistivas no movimento do solo.

Através dos ensaios de resistividade em laboratório observou-se a influência da relação água-solo para o ensaio da geofísica. Nas pseudo-seções regiões onde havia maior presença de água, a resistividade chegou a valores mínimos, assim pode-se observar caminhos preferenciais de fluxo abaixo da área de escorregamento, sendo esse um minorador do fator de segurança da encosta. O início desse fluxo acontece em uma região saturada com área de nascente e córrego superficial, mesmo a região sendo provida de drenos superficiais profundos a área apresenta elevado grau de saturação.

Outro fator relevante analisado foi o comparativo dos limites de Atterberg e a umidade natural dos solos coletados, demonstrando que a fração fina dos solos no campo apresenta-se no estado plástico, o que por sua vez contribui para o fenômeno de rastejo na região.

A classificação granulométrica dos solos segundo a ABNT pode ser dividida em três tipos: argila siltosa, argila arenosa e areia siltosa. Por se tratar de um solo argiloso analisou-se a atividade das argilas indicando serem inativas e possivelmente com presença de caulinita em sua formação. Porém quando classificada pelo sistema unificada dos solos (SUCS), as amostras foram classificadas entre siltes de baixa plasticidade a média plasticidade.

Através dos ensaios de cisalhamento direto observou-se valores dos ângulos de atrito interno das amostras oscilam próximos de um valor médio igual a $25,5^\circ$, esse valor é bastante compatível com as condições de solo que sofreu movimentação de massa.

Nos ensaios de resistividade em laboratório, observou-se dois grupos distintos de amostras: um grupo com resistividade na retenção de umidade entre 550-860 Ohm.m e outro grupo abaixo de 250 Ohm.m.

Nos comparativos entre as resistividades de campo e laboratório, as amostras, que no ensaio da geofísica apresentaram menor resistividade, foram as que apresentaram menor resistividade em laboratório, o mesmo se observou para as maiores resistividades. No entanto duas amostras que foram coletadas, observou-se incertezas ao se determinar a resistividade de campo devido aos modelos de interpolação do ensaio da geofísica para a superfície do terreno, um menor espaçamento entre os eletrodos potenciais no ensaio da geofísica indicariam uma diminuição nessa incerteza.

Ao se comparar a queda ôhmica no $n=1$ do ensaio da geofísica foi possível a classificação de dois grupos distintos: um grupo com valores superiores a 300 μV e outro grupo com valores abaixo de 62 μV . Assim obteve-se um melhor ajuste dos comparativos da resistividade de campo e de laboratório. As mesmas duas amostras citadas anteriormente apresentaram alta resistividade em laboratório e baixa resistividade no ensaio geofísico, isso aconteceu devido em campo essas amostras encontrarem-se em zona preferencialmente saturada. Assim pode-se observar que a umidade em campo tende a mascarar as propriedades de resistividade do solo. Necessitando uma avaliação criteriosa dos resultados fornecidos pela geofísica.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos nesta pesquisa despertaram uma série de questões que podem ser objeto de estudos futuros. Entre elas podem se destacar:

- realização de levantamentos planialtimétricos com maior resolução na encosta a fim de se observar o escalonamento do perfil.
- realização de ensaios geofísicos em diferentes épocas do ano, a fim de se observar a variação dos parâmetros geofísicos ao longo do tempo. Correlacionar os diferentes resultados com a variação da umidade de campo e precipitações pluviométricas.
- definir a relação entre a curva característica de resistividade do solo moldado no índice de vazios natural e o ensaio com amostra indeformadas;
- com os novos parâmetros geotécnicos determinados realizar simulações estabilidade da encosta.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica** – NBR-6508, 1984a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica** – NBR-7181, 1984b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de liquidez** – NBR-7180, 1984c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de plasticidade** – NBR-7180, 1984d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga constante** – NBR 13292, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de Compactação** – NBR-7182, 1986.

ABNT/CB-03 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS / COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE. **PROJETO 03:102.01-008: Materiais de Aterramento**. Agosto, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)** – NBR 7117, 1981.

ABU-HASSANEIN, Z. S.; BENSON, C. H.; BLOTZ, L. R. **Electrical Resistivity of Compacted Clays**. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, n. 5, p. 397-406, 1996.

AGOSTINHO, Silvia M. L; VILLAMI, Ruth F. V; AGOSTINHO NETO, Augusto; ARANHA, Hernani. **O eletrólito suporte e suas múltiplas funções em processos de eletrodo**. Revista Química Nova, Vol 27, no. 5. São Paulo, 2004.

BERTULANI, Carlos. **O que é geofísica?** Projeto de ensino a distância do Instituto de física da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.if.ufrj.br/teaching/geo/sbgfque.html>. Acessado em: maio 2012.

BS - British Standard Methods. **British Standard Methods of test for Soil for Civil Engineering purpose – part 7 Shear strength tests (total stress)** – BS 13777:1990.

BOSZCZOWSKI, Roberta Bonfim. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaise de Curitiba**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, 2008

BOSZCZOWSKI, Roberta Bonfim; SILVA, José Maurílio. **Avaliação da resistividade elétrica de um perfil de solo residual em função do intemperismo e teor de umidade**. COBRANSEG. Curitiba, 2006.

BURGER, H. R.; SHEEHAN, A. F.; JONES, C. H. **Introduction to Applied Geophysics**. Prentice Hall, New York, 1992.

CAMPANELLA, R. G.; WEEMEES, I. **Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies**. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, p. 557-567, 1990.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª Ed. rev. e amp. São Paulo: Editora ao Livro Técnico S. A, 2000.

CENPES - Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello. **Avaliação do comportamento geomecânico do maciço no acidente do duto OLAPA (km 57+50m)**. Relatório Técnico, CT-031/2001. Rio de Janeiro, 2001.

DYMINSKI, Andréa Sell. **Estabilidade de Taludes**. Notas de Aula. Universidade Federal do Paraná, 2003.

DEERE, D. U. e PATTON, F. D. **Slope Stability in Residual Soils**, In.: 4th PCSMFE Puerto Rico. Proc., State of the Volume, p. 87-170; 1971.

EISENBERGER, Cícero Nei. **Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul – RS**. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 2003.

ELIS, Vagner Roberto. **Métodos elétricos e eletromagnéticos**. Instituto de Astronomia Geofísica e Ciência Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/siae98/eletromag/eletromag.htm>>. Acessado em: maio de 2012.

FIORI, Alberto Pio; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª ed. rev. e amp. Curitiba: Editora UFPR, 2009.

G1. **Chuvas interrompem fornecimento de gás no RS**. Notícia de 25/11/2008. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL874518-5598,00-CHUVAS+INTERROMPEM+FORNECIMENTO+DE+GAS+NO+RS.html>> Acesso em: 20 abr 2010.

GANDOLFO, O. C. B.; ELIS, V. R.; SANCEVERO, S. S. (2010) **A geofísica como ferramenta na investigação do meio físico: aplicações em meio ambiente, engenharia e na prospecção de petróleo**. In: Anuário do Instituto de Geociências, v. 26. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/60ra/textos/MR-Geofisica.pdf>>. Acessado em: 02 set 2010.

GAMBOA, Luis R. A.; SILVA, Jose M.; RIBAS, Carlos E.; RIBAS, Rosane Maris. **Medidas da resistência de malhas de terra energizadas, em SES 34,5/13,8 KV e obtenção da resistividade de solos de SES, em laboratório.** Grupo VIII – Grupo de subestações e equipamentos elétricos – GSE. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de energia elétrica - SNPTEE . Curitiba, 2005.

GCOI/SCM. **Obtenção da curva característica de resistividade em relação a porcentagem de água em solos.** In: III Encontro Técnico de Corrosão e Proteção. Recomendação Técnica, 1995.

GPR – Geoscience Geofísica Ltda (2010). **Métodos Geofísicos.** Acessível em http://www.gpr-geoscience.com.br/metodos_geofisicos.htm. Acessado em 02 de setembro de 2010.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

IS/IEC 62561-7 – Internacional Standard / Internacional Electrotechnical Commission. **Lightning protection system components (LPSC) – Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds.** Genebra - Suíça, Novembro, 2011.

JONGMANS, D.; GARAMBOIS, S. **Gephysical Investigation of Landslides: a Review.** In: Bulletin Société Géologique de France 178, 2 (2007) 101-112”, 2007.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de exploração** Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. Oficina de textos. São Paulo, 2009.

LACERDA, W.A.. **Comportamento Geotécnico de Massas Colúvias.** III Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul. Joinville. Anais: PP. 219-231. Joenville, 2002.

LACERDA, W.A. **Casos geotécnicos da região sul do país.** V Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul. Curitiba. Anais: PP. 13-23. Curitiba, 2006.

LPAGA (2011). **Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada.** Relatório Tomografia Elétrica 2D - Duto OLAPA – Morretes – Pr. Julho de 2011.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

O ESTADO DO PARANÁ. **O dinheiro paga?** Notícia de 20/01/2001. Disponível em: <http://www.sefloral.com.br/petrobras30.htm> Acesso em: 13 abr 2010 as 21:57.

ODEBRECHT, Edgar. **Medidas de Energia no Ensaio SPT.** Rio Grande do Sul, 2003. Universidade Rio Grande do Sul.

PEZZOTTA, Carlos Aurélio. **A importância da medição precisa de tensões residuais em dutos**. Notícia de 24/03/2010. Revista TN Petróleo. Disponível em: <<http://www.tnpetroleo.com.br/noticia/21903/a-importancia-da-medio-precisa-de-tenses-residuais-em-dutos>> Acesso em: 17 mai 2010 as 11:48.

PORSANI, José Luis. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP**. 145 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

POZDNYAKOV, Anatoly; POZDNYAKOVA, Larisa. **Electrical fields and soil properties**. 17th World Congress of Soil Science - WCSS. Thailand, 2002. Disponível em: <<http://www.landviser.com/PDF/17WorldCongress%20of%20Soil%20Science.pdf>>

REYNOLDS, John Merriman. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 1997.

RINALDI, Victor; GUICHON, Martin; FERRERO, Víctor; SERRANO, Carlos; PONTI, Norberto. **Resistivity Survey of the Subsurface Conditions in the Estuary of the Rio de La Plata**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE / January, 2006.

SAMOUËLIAN A., COUSIN, I., Tabbagh, A., BRUAND, A., and RICHARD, G. **Electrical resistivity survey in soil science: a review**. Soil Tillage Res., 83(2), 173-193, França, 2005.

SCHNAID, Fernando. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo. Oficina de Textos. 2000.

SHARMA, Prem Vallabh. **Environmental and Engineering Geophysics**. Cambridge University Press, 1997.

SILVA JUNIOR, Jair Silveira da; FERREIRA, Francisco José Fonseca; STEVANATO, Rodoilton. **Aplicações dos métodos gravimétrico e eletroresistivimétrico em área de risco geotécnico do sistema aquífero carstíco em Almirante Tamandaré-PR**. Revista Brasileira de Geofísica RBGf. UFPR, 2006.

SILVEIRA, Rodrigo Moraes da. **Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbó do Sul (SC)**. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 2003.

SUZUKI, Sílvia. **Propriedades geomecânicas de alguns solos residuais e coluviais ao longo do oleoduto Curitiba-Paranaguá**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, 2004.

TEIXEIRA, Luciana Muniz. **Análise numérica do comportamento de um oleoduto sujeito a movimentos de encosta**. Tese doutorado. PUCRJ. Rio de Janeiro, 2008.

TELFORD, Willian Murray; GELDART, L. P.; SHERIFF, Robert. E. **Applied Geophysics**. 2nd Ed. Cambridge University Press, 1990.

TONUS, Bianca Penteado de Almeida. **Estabilidade e Taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense**. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, 2009.

TURNER, A. Keith; SCHUSTER, Robert L. **Landslides: Investigation and mitigation**. Special Report / Transportation Research Board, National Research Council; 247. NW, Washington, 1996.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Mcgraw Hill do Brasil, São Paulo, SP. 509 p, 1978.

WISÉN, R.; CHRISTIANSEN, A. V.; DAHLIN, T; AUKEN, E. (2008). **Experience from Two Resistivity Inversion Techniques Applied in Three Cases of Geotechnical Site Investigation**. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 134, 1730, 2008.


ANEXO I - QUADRO RESUMO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

QUADRO RESUMO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Local: OLAPA

Registro da Amostra		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Intervalo do CP	(m)	0,50-0,80	0,60-0,90	0,30-0,60	0,60-0,90	0,40-0,70	0,40-0,70	0,40-0,70
Peso Específico Natural								
γ	(kN/m ³)	15,92	16,16	14,72	18,42	15,80	-	16,19
Massa Específica Natural								
ρ_{nat}	(g/cm ³)	1,62	1,65	1,50	1,88	1,61	-	1,65
Umidade Natural								
w	(%)	54,2	40,4	59,0	29,8	58,3	-	40,9
Índice de Vazio Natural								
e	-	1,75	1,64	2,25	0,98	1,93	-	1,32
Distribuição Granulométrica								
Pedra (>60mm)	(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	2,6
Pedregulho Fino (60--2,0mm)	(%)	0,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5
Areia Grossa (2,0 mm--0,6mm)	(%)	1,5	5,0	2,0	14,1	1,8	16,8	10,4
Areia Média (0,6 mm--0,2 mm)	(%)	4,7	7,8	4,2	16,1	4,1	18,6	14,5
Areia Fina (0,2 mm--0,06 mm)	(%)	5,1	11,7	12,0	19,0	6,6	12,1	14,1
Silte (0,06--0,002 mm)	(%)	17,8	32,6	10,5	25,6	18,8	29,6	30,1
Argila (< 0,002 mm)	(%)	70,9	42,8	71,2	24,7	68,4	18,0	27,8
Fração fina (< 0,074 mm) ? # 200	(%)	89,3	77,9	88,9	61,0	88,3	48,7	61,7
Limites de Atterberg								
Limite Liquidez (LL)	(%)	80	64	94	49	87	43	51
Limite Plasticidade (LP)	(%)	49	40	53	34	51	32	40
Índice de Plasticidade (IP)	(%)	31	24	41	15	36	11	11
Índice de Grupo (IG)	-	20	18	20	8	20	3	7
Índice de Atividade (IA)	-	0,44	0,56	0,58	0,61	0,53	0,61	0,40
Índice de Consistência (IC)	-	0,83	0,98	0,85	1,28	0,80	-	0,92
Massa Específica dos Grãos								
ρ	(g/cm ³)	2,925	3,056	3,056	2,738	2,959	2,740	2,736
Pemeabilidade								
k ₂₀	(cm/s)	1,20E-03	3,04E-03	2,08E-04	8,75E-04	1,91E-04	-	3,00E-03
Classificação do material								
USCS	-	MH	MH	MH	ML-MH	MH	ML-MH	ML-MH
ABNT	-	Argila Siltosa	Argila Siltosa	Argila arenosa	Areia Siltosa	Argila Siltosa	Areia Siltosa	Areia Siltosa

ANEXO II - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

		ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE			
Local da Coleta: OLAPA		Amostra: A1			
Classificação: Argila Siltosa		Profundidade da Coleta: 0,50 - 0,80 m			
Massa Específica dos Grãos (g/cm ³) 2,925					
Condições iniciais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Altura do CP (mm)	20	19	20	19	20
Comprimento (mm)	100	100	100	100	100
Largura (mm)	100,1	99,7	99,3	99,7	100,1
Área (cm ²)	100,2	99,9	99,4	99,7	100,1
Teor de Umidade (final) (%)	72,1	70,9	55,8	56,0	56,9
Teor de Umidade (inicial) (%)	52,0	54,2	51,2	51,6	40,9
Massa específica natural (g/cm ³)	1,522	1,574	1,614	1,693	1,670
Massa específica seca (g/cm ³)	1,001	1,021	1,068	1,117	1,185
Índice de Vazios	1,92	1,87	1,74	1,62	1,47
Grau de Saturação Final(%)	100,0	100,0	93,9	100,0	100,0
Cisalhamento					
Velocidade de deslocamento (mm/min)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Parâmetros de resistência determinados para deslocamento horizontal de 7,5 mm					
Tensão Normal (kPa)	13,3	25,9	37,1	59,4	104,6
Tensão Cisalhante (kPa)	12	37	151	332	275
Deslocamento Horizontal (mm)	7,420	7,440	7,390	7,480	7,420
Deformação Vertical (mm)	0,260	0,375	0,815	1,145	0,670
Coesão (kPa) 8,4					
Ângulo de Atrito (°) 72,6					

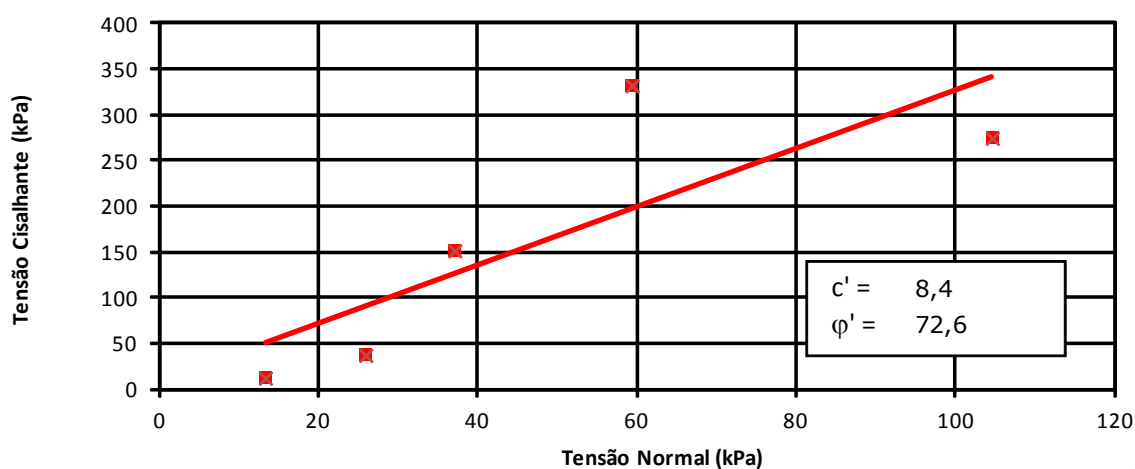
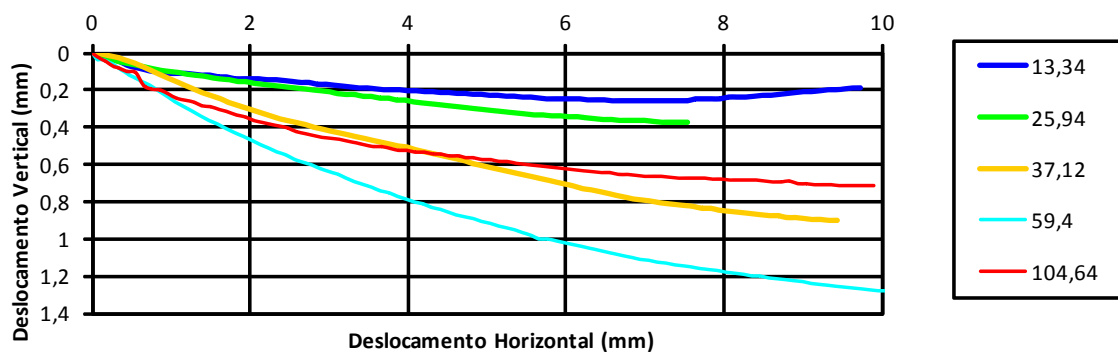
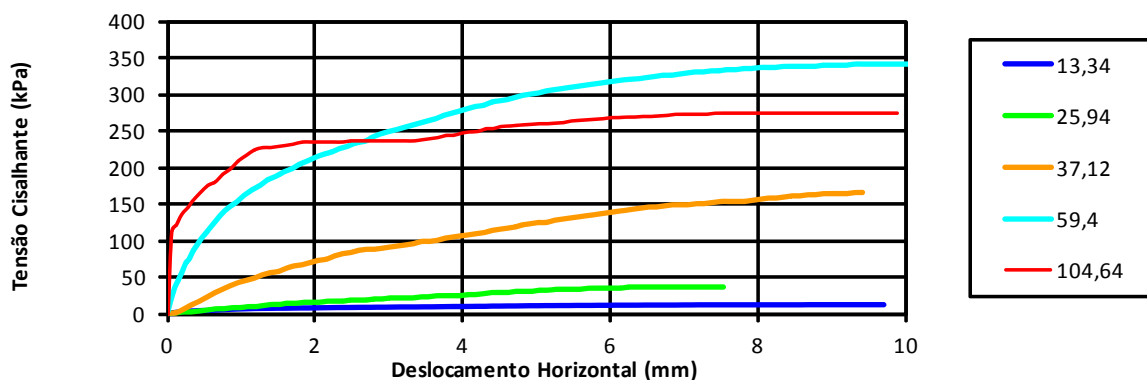


ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: OLAPA
Classificação: Argila Siltosa

Amostra: A1
Profundidade da Coleta: 0,50 - 0,80 m





ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: OLAPA

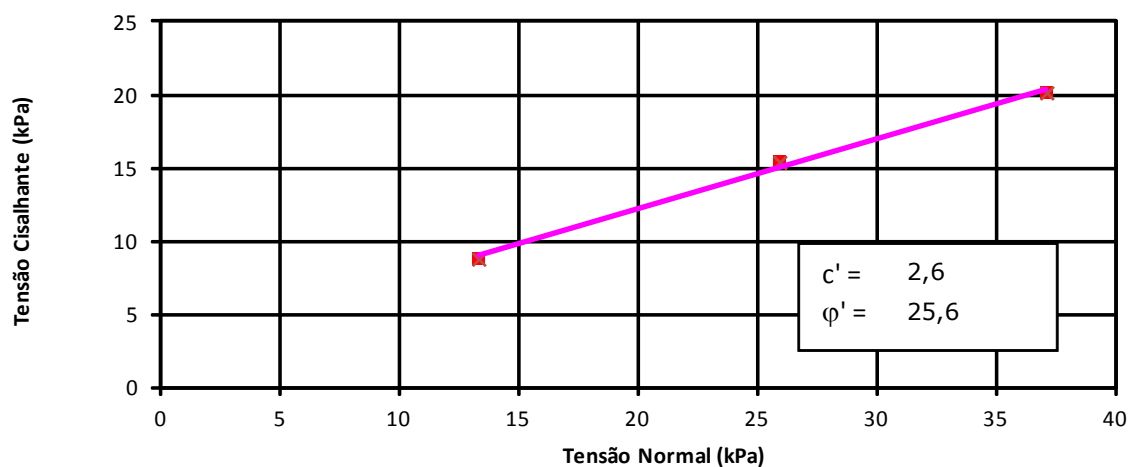
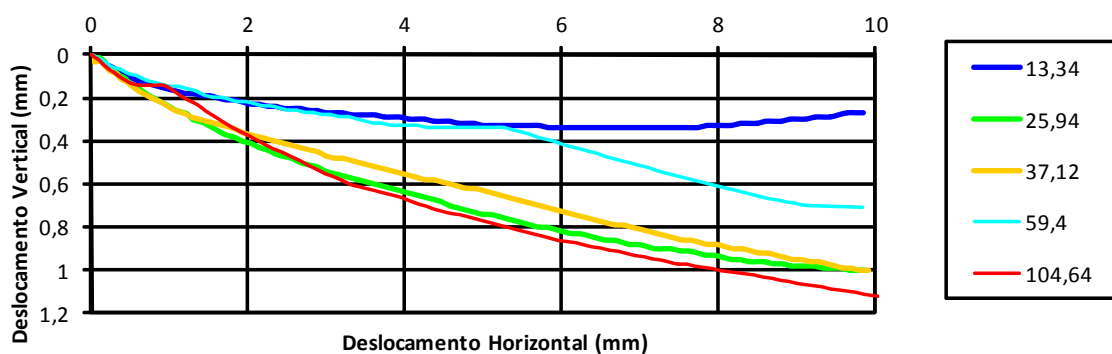
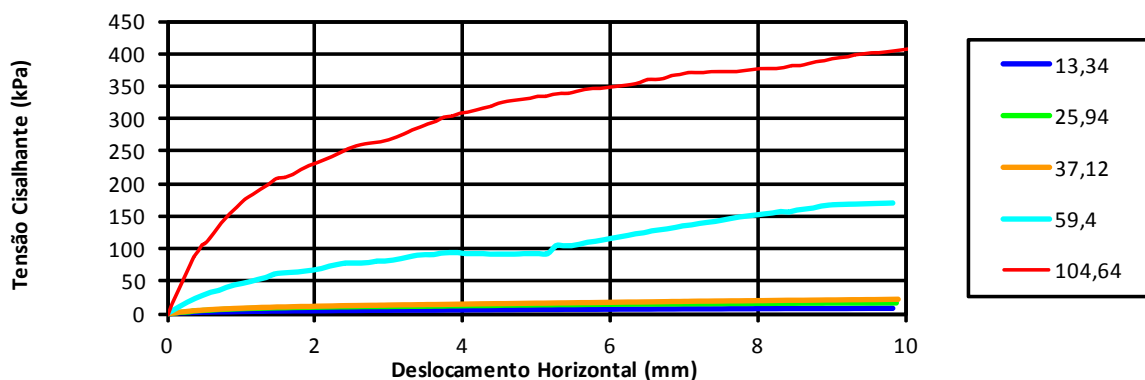
Amostra:

A2

Classificação: Argila Siltosa

Profundidade da Coleta:

0,60-0,80m

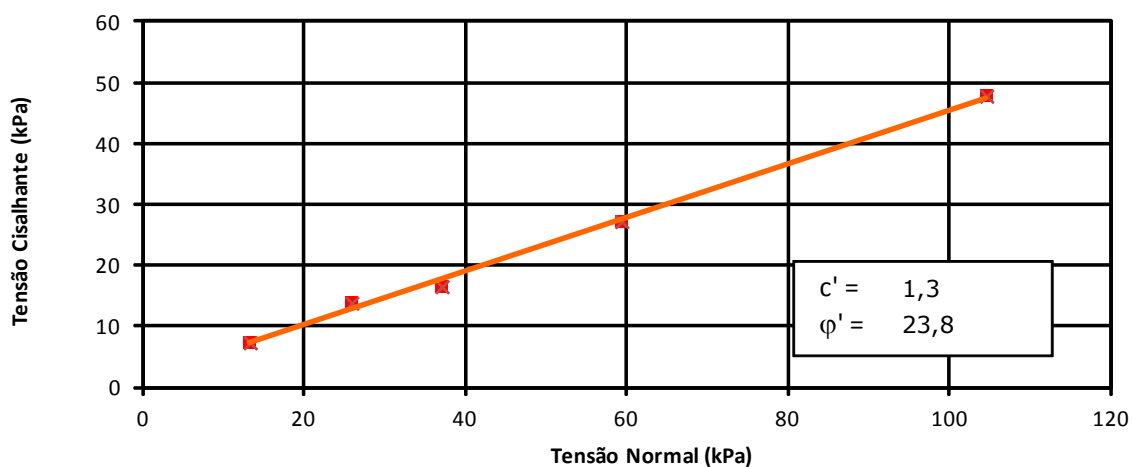
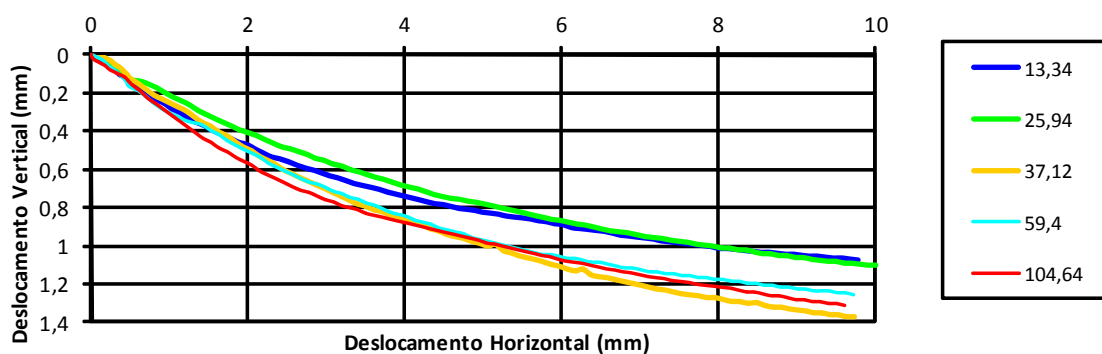
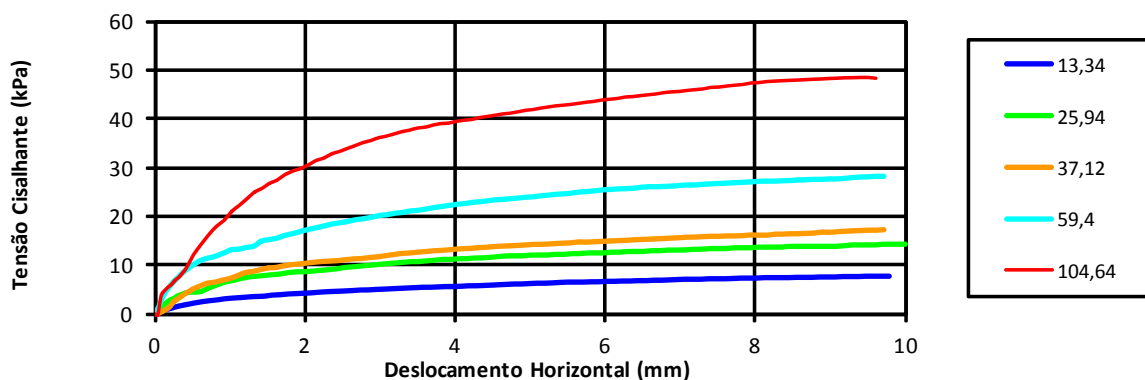





ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: Amostra: A3
 Classificação: Argila Arenosa Profundidade da Coleta: 0,30-0,60m



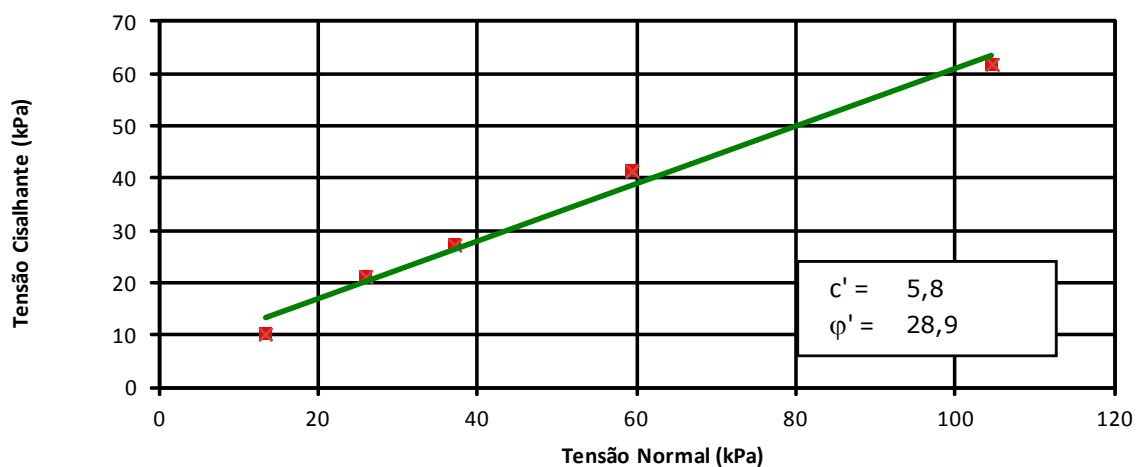
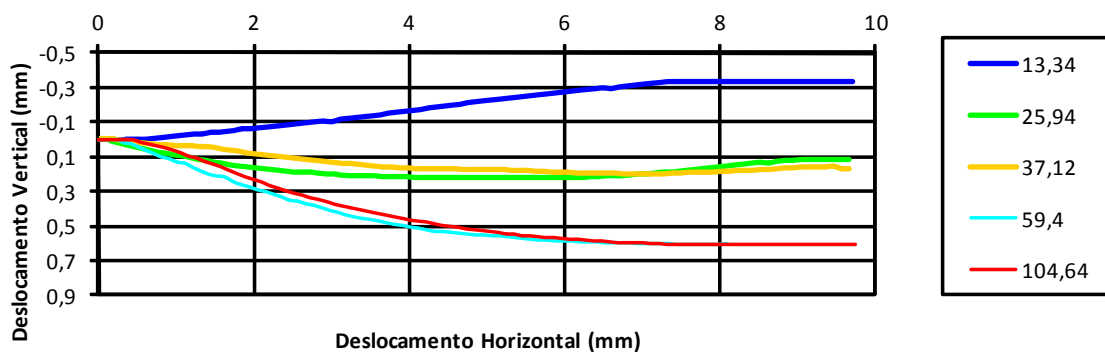
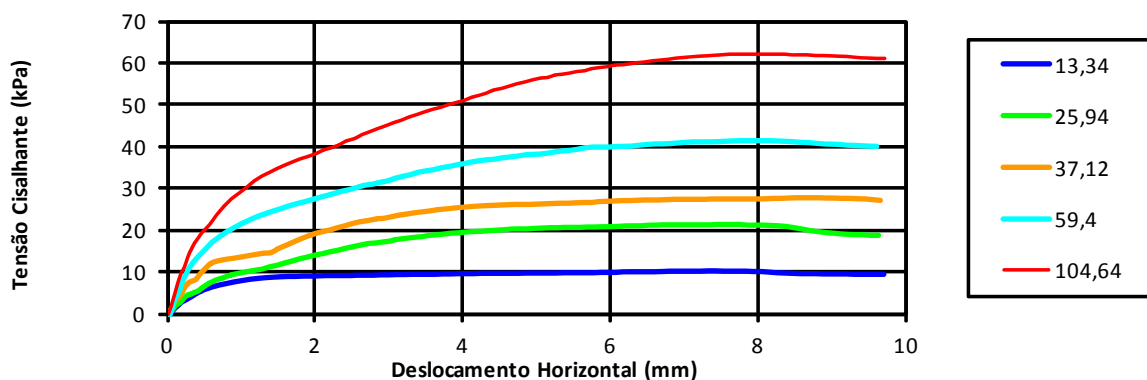
		ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE			
Local da Coleta: OLAPA		Amostra: A4			
Classificação: Areia Siltosa		Profundidade da Coleta: 0,60-0,90m			
Massa Específica dos Grãos (g/cm ³) 2,738					
Condições iniciais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Altura do CP (mm)	20	19	20	19	20
Comprimento (mm)	100	100	100	100	100
Largura (mm)	100,1	99,7	99,3	99,7	100,1
Área (cm ²)	100,2	99,9	99,4	99,7	100,1
Teor de Umidade (final) (%)	38,1	30,7	31,2	32,4	33,1
Teor de Umidade (inicial) (%)	29,8	25,1	24,2	26,1	27,9
Massa específica natural (g/cm ³)	1,788	1,854	1,794	1,779	1,841
Massa específica seca (g/cm ³)	1,377	1,482	1,444	1,411	1,440
Índice de Vazios	0,99	0,85	0,90	0,94	0,90
Grau de Saturação Final(%)	100,0	99,4	95,4	94,4	100,0
Cisalhamento					
Velocidade de deslocamento (mm/min)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Parâmetros de resistência determinados para deslocamento horizontal de 8 mm					
Tensão Normal (kPa)	13,3	25,9	37,1	59,4	104,6
Tensão Cisalhante (kPa)	10	21	27	41	62
Deslocamento Horizontal (mm)	7,930	7,975	8,000	7,970	7,940
Deformação Vertical (mm)	-0,330	0,155	0,185	0,605	0,605
Coesão (kPa) 5,8					
Ângulo de Atrito (°) 28,9					



ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: Amostra: A4
 Classificação: Areia Siltosa Profundidade da Coleta: 0,60-0,90m



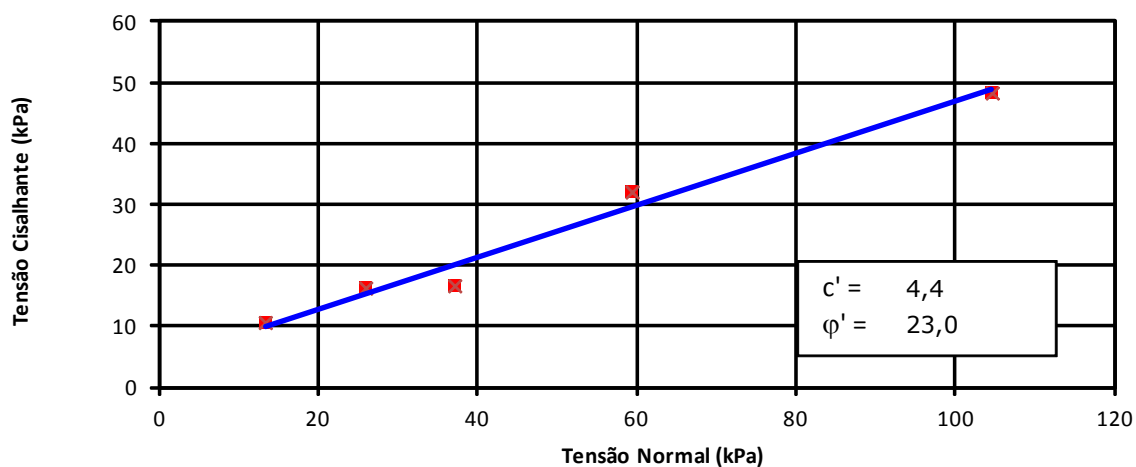
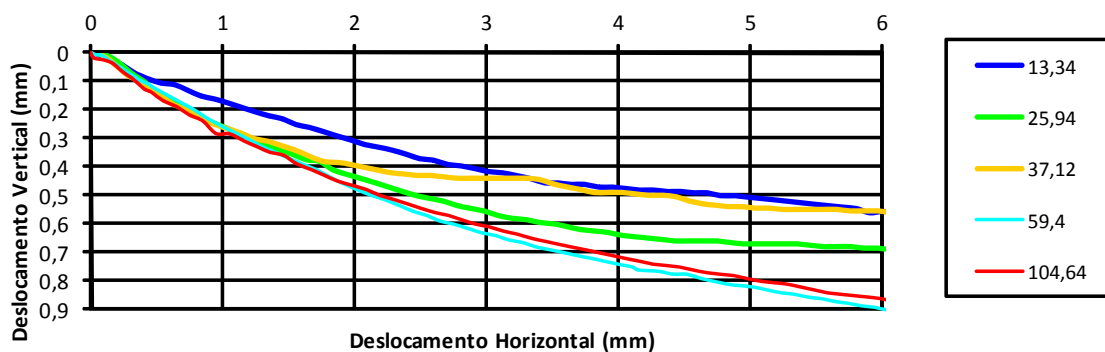
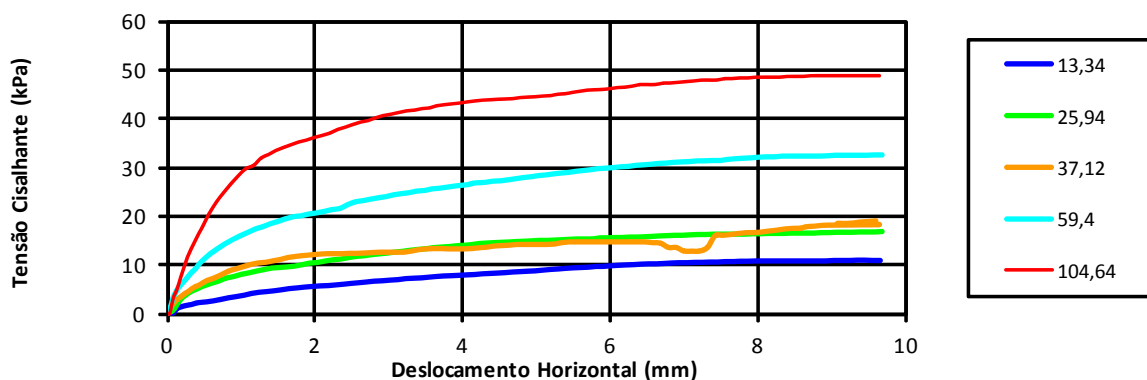


ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: OLAPA
Classificação: Argila Siltosa

Amostra: A5
Profundidade da Coleta: 0,40-0,70m





ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

RELATÓRIO DO ENSAIO - SÍNTESE

Local da Coleta: Amostra: A7
 Classificação: Areia Siltosa Profundidade da Coleta: 0,40-0,70m

